RICHARD P. FEYNMAN

O PRAZER DA DESCOBERTA

Os Melhores Textos Breves de Richard Feynman

ORGANIZAÇÃO
JEFFREY ROBBINS

TRADUÇÃO
ANA CORREIA MOUTINHO

gradiva

Título original: *The Pleasure of Finding Things Out — The best short works of Richard P. Feynman*
© *Carl Feynman* e *Michelle Feynman*, 1999
Organização, introdução, introduções de capítulos e notas © Jeffrey Robbins, 1999
Tradução: *Ana Correia Moutinho*
Revisão do texto: *José Soares de Almeida*
Capa: fotografia: © *Christopher Sykes*
design gráfico: *Multitipo — Artes Gráficas, L.da*
Fotocomposição: *Gradiva*
Impressão e acabamento: *Multitipo — Artes Gráficas, L.da*
Reservados os direitos para Portugal por:
Gradiva — Publicações, L.da
Rua Almeida e Sousa, 21, r/c, esq. — 1399-041 Lisboa
Telefs. 21 397 40 67/8 — 21 397 13 57 — 21 395 34 70
Fax 21 395 34 71 — Email: geral@gradiva.mail.pt
URL: http://www.gradiva.pt
1.ª edição: *Agosto de 2006*
Depósito legal n.º 246 422/2006

gradiva
Editor: *Guilherme Valente*

O presente volume não inclui alguns dos textos da edição original, já publicados noutras obras da colecção Ciência Aberta, a saber: «Los Alamos a partir de baixo», «A ciência do culto da carga» (ambos publicados em *Está a Brincar, Sr. Feynman*, Gradiva, 1988), «O valor da ciência», «O Sr. Feynman vai a Washington investigar o malogro do vaivém espacial *Challenger*» e «É tão simples como um, dois, três» (publicados em *Nem Sempre a Brincar, Sr. Feynman*, Gradiva, 1989).

Índice

Agradecimentos 7
Prefácio — *This side idolatry* 9
Introdução do organizador 15

1. O prazer da descoberta 19

Convite para a bomba 20
Sucesso e sofrimento 21
«Não preciso de ser bom porque eles pensam que vou ser bom» 22
O prémio Nobel — valeu a pena? 23
As regras do jogo 25
Esmagar átomos 27
Deixa o George fazê-lo 30
Aborrecido pela história 31
Tal pai, tal filho 32
Ciência que não é ciência... 33
Dúvida e incerteza 34

2. Os computadores do futuro 37

Introdução 37
Computadores paralelos 39

Redução da perda de energia 42
Redução do tamanho 48
Perguntas e respostas 55

3. O papel da cultura científica na sociedade moderna 65

4. Há muito espaço lá no fundo 85

Um convite para entrar num novo campo da física 86
Como é que escrevemos pequeno? 88
Informação numa escala pequena 91
Melhores microscópios electrónicos 92
O maravilhoso sistema biológico 95
A miniaturização do computador 96
A miniaturização por evaporação 97
Problemas de lubrificação 99
Uma centena de pequenas mãos 103
Rearranjando os átomos 104
Átomos num mundo pequeno 106
Competição de liceu 108

5. O que é a ciência? 109

6. O homem mais inteligente do mundo 127

7. Richard Feynman constrói o universo 145

8. A relação da ciência com a religião 165

Atitude de incerteza 169
Crença em Deus — e nos factos da ciência 170
O comunismo e o ponto de vista científico 172
Interligações 173
A ciência e as questões morais 175
As heranças da civilização ocidental 177

Referências 179

Agradecimentos

Gostaria de agradecer a Michelle e Carl Feynman pela sua generosidade e apoio constante, à Dr.ª Judith Goodstein, Bonnie Ludt e Shelley Erwin, de Caltech, pela ajuda indispensável e pela hospitalidade e, especialmente, ao professor Freeman Dyson pelo elegante e iluminador prefácio.

Gostaria também de expressar os meus agradecimentos a John Gribbin, Tony Hey e Melanie Jackson pelos excelentes e frequentes conselhos durante a produção deste livro.

Setembro de 1999
Jeffrey Robbins
Reading, Massachusetts

PREFÁCIO

This side idolatry[1]

«I did love the man this side idolatry as much as any» («Amava este homem com devoção, tanto como os outros»), escreveu o dramaturgo isabelino Ben Jonson[2]. O «homem» era o amigo e mentor de Jonson, William Shakespeare. Jonson e Shakespeare eram ambos escritores bem sucedidos de peças de teatro. Jonson era educado e estudioso, Shakespeare era despreocupado e um génio. Não havia ciúmes entre eles. Shakespeare era nove anos mais velho e já enchia os palcos londrinos com obras-primas antes de Jonson ter começado a escrever. Shakespeare era, como Jonson dizia, «honesto, com uma natureza franca e aberta», e deu ao seu jovem amigo tanto ajuda prática como encorajamento. A ajuda mais importante que Shakespeare lhe deu foi representar um dos papéis princi-

[1] Expressão original que denota devoção. *(N. da T.)*

[2] Ben Jonson (1572-1637), dramaturgo inglês.

pais na primeira peça de Jonson, *Every Man in His Humour,* quando esta foi apresentada em 1598. A peça foi um sucesso retumbante e lançou a carreira profissional de Jonson. Jonson tinha então 25 anos e Shakespeare 34. Depois de 1598, Jonson continuou a escrever poemas e peças, muitas delas representadas pela companhia de Shakespeare. Jonson tornou-se famoso por mérito próprio como poeta e académico e no final da sua vida foi homenageado com um enterro na Abadia de Westminster. Porém, nunca esqueceu a dívida para com o seu velho amigo.

Quando Shakespeare morreu[3], Jonson escreveu-lhe um poema, «À memória do meu adorado mestre, William Shakespeare», contendo os famosos versos:

> Ele não era de uma época, mas de todos os tempos.
>
> E embora soubesse pouco latim e menos grego,
> Para o honrar, não procurarei
> Pôr nomes, mas chamarei o retumbante Ésquilo,
> Eurípides e Sófocles...
> Para viverem novamente e ouvirem a sua passada.
>
> A própria natureza estava orgulhosa dos seus feitos,
> E rejubilava ao usar o manto dos seus versos...
> Mas não devo atribuir tudo à natureza. A arte,
> Meu gentil Shakespeare, deve apreciar uma parte,
> Pois embora as coisas do poeta sejam naturais
> A sua arte dá-lhe o aspecto; e ele,
> Que labora para escrever um verso vivo, deve suar...
> Pois que um bom poeta se faz, tanto quanto nasce.

O que é que Jonson e Shakespeare têm a ver com Richard Feynman? Simplesmente isto: posso dizer, como

[3] William Shakespeare morreu a 23 de Abril de 1616.

Jonson disse, «amava este homem com devoção, tanto como os outros».

O destino proporcionou-me a sorte tremenda de ter Feynman como mentor. Eu era o estudante educado e académico que veio de Inglaterra para a Universidade de Cornell em 1947 e ficou imediatamente encantado pelo génio despreocupado de Feynman. Com a arrogância da juventude, decidi que podia fazer de Jonson para o Shakespeare de Feynman. Não estava à espera de conhecer Shakespeare em solo americano, mas não tive qualquer dificuldade em reconhecê-lo logo que o vi.

Antes de conhecer Feynman, eu tinha publicado uma série de artigos matemáticos, cheios de truques espertos, mas completamente falhos de importância. Quando conheci Feynman, soube imediatamente que tinha acabado de entrar noutro mundo. Ele não estava interessado em publicar artigos bonitos. Ele lutava, mais intensamente do que eu alguma vez tinha visto alguém fazê-lo, para compreender o funcionamento da natureza, reconstruindo a física de baixo para cima. Tive a sorte de o conhecer perto do final de um combate de oito anos. A nova física que ele tinha imaginado enquanto estudante de John Wheeler sete anos antes estava, finalmente, a coalescer numa visão coerente da natureza, uma visão a que chamava a «aproximação do espaço-tempo». Em 1947, a visão ainda estava inacabada, cheia de pontas soltas e inconsistências, mas vi logo que tinha de estar certa. Procurava todas as oportunidades para ouvir Feynman falar, para aprender a nadar no dilúvio das suas ideias. Ele adorava conversar e recebia-me como ouvinte. E assim ficámos amigos para a vida.

Durante um ano observei Feynman a aperfeiçoar o seu modo de descrever a natureza com figuras e diagramas até ter atado todos os nós e removido as inconsistências.

Começámos então a calcular números, utilizando os seus diagramas como guia. Com uma velocidade espantosa, ele era capaz de calcular quantidades físicas que podiam ser directamente comparadas com a experiência. As experiências concordavam com os seus números. No Verão de 1948 podíamos ver as palavras de Jonson tornarem-se verdade: «A própria natureza estava orgulhosa dos seus feitos e rejubilava ao usar o manto dos seus versos.»

Durante este mesmo ano em que privei e conversei com Feynman estudei também o trabalho dos físicos Schwinger e Tomonaga, que seguiam vias mais convencionais e chegavam aos mesmos resultados. Schwinger e Tomonaga haviam obtido sucesso independentemente, utilizando métodos mais laboriosos e complicados, nos cálculos que Feynman podia obter directamente dos seus diagramas. Schwinger e Tomonaga não reconstruíram a física. Tomaram-na tal como a encontraram e apenas introduziram novos métodos matemáticos para extrair números dela. Quando se tornou claro que os resultados dos seus cálculos concordavam com os de Feynman, soube que me tinha sido dada uma oportunidade única para reunir as três teorias. Escrevi um artigo intitulado «As teorias da radiação de Tomonaga, Schwinger e Feynman», explicando por que é que as teorias pareciam diferentes, mas eram fundamentalmente a mesma. O artigo foi publicado na *Physical Review* em 1949 e lançou a minha carreira profissional tão decisivamente como *Every Man in His Humour* lançou a de Jonson. Tinha então, tal como Jonson, 25 anos. Feynman tinha 31, era três anos mais novo do que Shakespeare em 1598. Tive o cuidado de tratar os meus três protagonistas com igual dignidade e respeito, mas no meu coração sabia que Feynman era o maior dos três e que o principal objectivo do meu artigo era tornar estas ideias revolucionárias acessíveis aos físicos do mundo inteiro. Feynman encora-

jou-me activamente a publicar as suas ideias e nem uma só vez se queixou de estar a roubar-lhe a ribalta. Ele era o actor principal na minha peça.

Um dos bens mais queridos que trouxera de Inglaterra para a América era O *Essencial de Shakespeare,* de J. Dover Wilson, uma pequena biografia de Shakespeare que continha a maioria das citações de Jonson que reproduzi aqui. O livro de Wilson não é uma obra de ficção nem um trabalho de história, mas algo intermédio. É baseado no testemunho em primeira mão de Jonson e outros, mas Wilson utilizou a sua imaginação juntamente com os escassos documentos históricos para dar vida a Shakespeare. Nomeadamente, a evidência mais antiga de que Shakespeare actuou na peça de Jonson vem de um documento datado de 1709, mais de cem anos depois do acontecimento. Sabemos que Shakespeare era famoso como actor tal como enquanto escritor e não vejo razão para duvidar da história tradicional contada por Wilson.

Felizmente, os documentos que fornecem provas sobre a vida e os pensamentos de Feynman não são tão escassos. O presente volume é uma colecção de tais documentos, proporcionando-nos a voz autêntica de Feynman gravada nas suas aulas e escritos ocasionais. Estes documentos são informais, dirigidos a audiências gerais, e não aos seus colegas cientistas. Neles vemos Feynman tal como era, brincando com as ideias, mas sempre sério sobre as coisas que lhe interessavam. As coisas importantes eram a honestidade, a independência e a facilidade de admitir a ignorância. Detestava a hierarquia e apreciava a amizade das pessoas em todos os caminhos da vida. Era, como Shakespeare, um actor com talento para a comédia.

Para além da sua paixão transcendente pela ciência, Feynman tinha também um grande apetite por piadas e prazeres humanos normais. Uma semana depois de o conhe-

cer escrevi uma carta aos meus pais em Londres em que o descrevia como «meio génio e meio palhaço». Por entre as suas lutas heróicas para compreender as leis da natureza, ele adorava relaxar com os amigos, tocar os seus tambores e entreter toda a gente com truques e histórias. Também nisto se assemelhava a Shakespeare. Do livro de Wilson retirei o testemunho de Jonson:

> Quando se propunha escrever juntava o dia à noite; pressionava-se sem descanso, não se importando de o fazer até desmaiar; e, quando acabava, retornava novamente a todas as diversões e liberdades; era quase um desespero trazê-lo de volta ao seu livro, mas, se o conseguisse, tornava-se mais forte e valioso.

Assim era Shakespeare e era também o Feynman que conheci e adorei com devoção.

Freeman J. Dyson
Instituto de Estudos Avançados
de Princeton, Nova Jérsia

Introdução do organizador

Recentemente, tive o privilégio de estar presente numa conferência histórica no venerável Laboratório Jefferson, na Universidade de Harvard. O conferencista era a professora Lene Hau, do Instituto Rowland, que tinha acabado de fazer uma experiência excitante que fora relatada não só na distinta revista científica *Nature,* mas também na primeira página do *New York Times.* Na experiência, ela (com o seu grupo de investigação de estudantes e cientistas) passou um feixe de luz através de um novo tipo de matéria chamado condensado de Bose-Einstein (um estado esquisito em que um grupo de átomos, arrefecidos até quase ao zero absoluto, praticamente deixa de se mover e, juntos, actua como uma partícula), que atrasou esse feixe de luz até ao ritmo inacreditavelmente lento de 61 quilómetros por hora! A luz, que normalmente viaja à velocidade de 300 000 quilómetros por *segundo* (ou 1080 milhões de quilómetros por hora) no vácuo, desloca-se mais devagar quando passa através de um meio como o ar ou o vidro, mas apenas uma fracção de um por cento

do seu valor no vácuo. Fazendo as contas, ver-se-á que 61 quilómetros por hora (pouco mais de um quilómetro por minuto), divididos por 1080 milhões de quilómetros por hora, dá 0,0000000565 da sua velocidade no vácuo! Colocando este resultado em perspectiva, é como se Galileu tivesse largado as suas bolas de canhão da Torre de Pisa e elas tivessem demorado dois anos a atingirem o chão!

A razão para os pontos de exclamação no parágrafo anterior é que fiquei sem fôlego na conferência (até Einstein teria ficado impressionado). Acho que, pela primeira vez na minha vida, senti uma migalha daquilo a que Feynman chamava «a excitação da descoberta[4]», o sentimento súbito (provavelmente semelhante a uma epifania, embora neste caso por interposta pessoa) de que tinha compreendido uma ideia nova e maravilhosa, que havia algo novo no mundo; que estava presente num acontecimento científico de grande significado, não menos dramático ou excitante do que o sentimento do Newton quando percebeu que a misteriosa força que levara a apócrifa maçã a cair-lhe na cabeça era a mesma que fazia com que a Lua orbitasse a Terra ou o de Feynman quando deu aquele primeiro passo na compreensão da natureza da interacção entre a luz e a matéria, que acabou por levá-lo ao prémio Nobel.

Sentado naquela audiência, quase podia sentir Feynman nas minhas costas a segredar-me ao ouvido: «Vê? É por isto que os cientistas persistem nas suas investigações, que lutam tão desesperadamente por cada bocadinho de conhecimento, ficam noites inteiras acordados à procura da resposta para um problema, ultrapassam os obstáculos mais difíceis até ao próximo fragmento de compreensão para, finalmente, chegarem àquele momento feliz e excitante que

[4] No original, *the kick of discovery. (N. da T.)*

é parte do prazer da descoberta[5].» Feynman dizia sempre que não trabalhava em física pela glória ou pelos prémios, mas por *diversão,* pelo brilhante prazer de descobrir como funciona o mundo, o que o faz tilintar.

O legado de Feynman é a sua imersão e dedicação à ciência — a lógica, os métodos, a rejeição do dogma, a capacidade infinita de duvidar. Feynman acreditava e vivia na crença de que a ciência, quando usada com responsabilidade, pode ser não só divertida, mas de um valor inestimável para o futuro da sociedade humana. E, como todos os grandes cientistas, adorava partilhar a sua admiração pelas leis da natureza tanto com colegas como com leigos. *O Prazer da Descoberta* apresenta o melhor dos textos curtos de Feynman — a maior parte já publicados e um inédito.

A melhor maneira de apreciar a mística de Feynman é ler o livro, pois aqui encontra-se uma ampla variedade de tópicos sobre os quais Feynman pensou profundamente e discursou de forma tão charmosa, não apenas física — no ensino da qual jamais alguém o ultrapassou —, mas também religião, filosofia e pânico da exposição pública na academia, o futuro da computação e da nanotecnologia (da qual foi o pioneiro), humildade, diversão em ciência, o futuro da ciência e da civilização ou o modo como os cientistas debutantes devem encarar o mundo.

Feynman tinha uma atitude muito descontraída relativamente à correcção gramatical das suas conferências orais

---

[5] Outro dos acontecimentos mais excitantes, se não na minha vida, pelo menos na minha carreira de editor, foi ter encontrado as transcrições há muito enterradas e nunca publicadas de três palestras que Feynman deu na Universidade de Washington em inícios de 1960 e que deram origem ao livro *O Significado de Tudo,* mas esse foi mais o prazer de *encontrar* do que o prazer de *descobrir!*

e entrevistas, o que se vê claramente na maioria das peças, visto serem transcrições. Para manter este «sabor a Feynman», a maior parte destas curvas não gramaticais das frases foram mantidas. No entanto, sempre que a transcrição pobre tornava a frase incompreensível ou estranha, esta foi corrigida para facilitar a leitura. Creio que o resultado é uno, virtualmente incólume, ainda assim legível, «feynmanês».

Aclamado em vida, reverenciado em memória, Feynman continua a ser uma fonte de sabedoria para todas as pessoas. Espero que este tesouro das suas melhores palestras, entrevistas e artigos estimule e entretenha tanto as gerações de fãs devotos como os recém-chegados à mente única e frequentemente exuberante de Feynman.

Por isso, caro leitor, leia, não tenha receio de rir alto ocasionalmente ou de aprender uma lição ou outra sobre a vida; inspire-se e, acima de tudo, experimente o prazer da descoberta de um ser humano invulgar.

1
O prazer da descoberta

Esta é a transcrição editada de uma entrevista que Feynman deu em 1981 ao programa Horizon *da cadeia televisiva BBC, passado nos Estados Unidos como um episódio de* Nova. *Feynman já havia vivido a maior parte da sua vida nesta altura (viria a falecer em 1988), e era portanto capaz de reflectir sobre as suas experiências e façanhas com a perspectiva não vulgarmente alcançável por uma pessoa mais jovem. O resultado é uma discussão franca, informal e muito pessoal sobre vários temas queridos a Feynman: porque é que conhecer apenas o nome de alguma coisa é o mesmo que não saber absolutamente nada sobre ela; como ele e os seus colegas cientistas atómicos do Projecto Manhattan podiam beber e festejar o sucesso da terrível arma que haviam criado enquanto no outro lado do mundo, em Hiroxima, milhares de seres*

humanos tinham morrido ou estavam a morrer por causa dela; e porque Feynman poderia ter perfeitamente passado bem sem um Prémio Nobel.

Convite para a bomba

[Enquanto trabalhava na sua tese de doutoramento, Feynman foi convidado para se juntar ao projecto de desenvolvimento da bomba atómica.] Aquilo era uma coisa completamente diferente. Significava que teria de deixar a investigação que estava a fazer, que era o desejo da minha vida, ter tempo para fazer essa outra coisa que eu sentia que era minha obrigação fazer a fim de proteger a civilização. OK? Pronto, era este o meu dilema. A minha primeira reacção foi: não quero ser interrompido no meu trabalho normal para fazer essa coisa esquisita. É claro que também havia o problema moral de me envolver com a guerra, embora não tivesse muito a ver com isso, mas assustava-me pensar o que seria essa arma. Não havia nada que me assegurasse que, se nós a conseguíssemos, eles não a conseguiriam também, pelo que era muito importante tentar cooperar.

[Em inícios de 1943, Feynman juntou-se à equipa de Oppenheimer em Los Alamos.] No que respeita às questões morais, gostaria de falar sobre isso, porque o motivo original para começar o projecto — que era os alemães serem um perigo — lançou-me numa série de acções destinadas a construir o primeiro sistema em Princeton e depois em Los Alamos. Tentava fazer com que a bomba funcionasse, com todo o tipo de ensaios para a tornar uma bomba pior, ou o que quer que fosse, e todos trabalharam aquele tempo todo para ver se o conseguiam; todos trabalharam muito

no projecto, muito, num esforço de cooperação conjunto. E, uma vez tomada a decisão de o fazer, como em qualquer projecto deste género, continua-se sempre a trabalhar e a tentar ter sucesso. Mas diria que aquilo que fiz imoralmente foi esquecer a razão pela qual estava a fazê-lo, de tal modo que quando essa razão se alterou (porque a Alemanha tinha sido derrotada) nem um único pensamento sobre isso me veio à cabeça, quando devia ter reconsiderado por que continuava a fazê-lo. Simplesmente não pensei, OK?

Sucesso e sofrimento

[A 6 de Agosto de 1945 a bomba atómica explodiu sobre Hiroxima.] A única reacção de que me lembro — talvez estivesse cego pela minha própria reacção — foi uma felicidade e excitação consideráveis; fizeram-se festas e as pessoas embebedaram-se, o que criou um contraste tremendo entre aquilo que se passava em Los Alamos e, ao mesmo tempo, em Hiroxima. Eu também estava envolvido nesta ocasião feliz, e também bebi, e bêbado toquei tambores sentado na capota de um jipe, e havia uma excitação que percorria Los Alamos ao mesmo tempo que as pessoas morriam e lutavam em Hiroxima.

Tive uma reacção muito forte depois da guerra, de uma natureza peculiar — poderá ter sido apenas da bomba ou por quaisquer outras razões psicológicas, acabara de perder a minha mulher, ou isso —, mas lembro-me de estar em Nova Iorque com a minha mãe, num restaurante, logo depois, imediatamente depois, e, pensando em Nova Iorque, e sabendo como tinha sido a bomba em Hiroxima, quão grande era a área que abrangera e por aí fora, compreendi que, donde estávamos — não sei,

Rua 59 —, se fosse lançada uma bomba na Rua 34, esta se espalharia até nós e todas as pessoas seriam mortas, e todas as coisas seriam mortas, e nem sequer havia uma bomba disponível, mas era possível continuar a fazê-las, e portanto tudo estava como que condenado, porque me parecia — muito cedo, talvez mais cedo do que a outros que eram mais optimistas — que as relações internacionais e o modo como as pessoas se comportavam não eram diferentes do passado e continuariam a ser do mesmo modo, pelo que tinha a certeza de que seria utilizada novamente, muito em breve. Senti-me então muito desconfortável e pensei, acreditei mesmo, que era tudo um disparate. Via as pessoas a construírem uma ponte e dizia que elas não compreendiam, acreditava mesmo que era disparatado fazer o que quer que fosse porque de qualquer modo tudo seria destruído em breve; mas elas não compreendiam e eu tinha esta estranha visão de qualquer construção que visse e pensava que tolos que eram ao tentarem construir alguma coisa. Estava mesmo numa espécie de depressão.

«Não preciso de ser bom porque eles pensam que vou ser bom»

[Depois da guerra, Feynman juntou-se a Hans Bethe na Universidade de Cornell, recusando uma oferta de emprego no Instituto de Estudos Avançados de Princeton.] Deviam achar que eu era fantástico para me terem oferecido um emprego como este, mas não era fantástico e, portanto, apercebi-me de um novo princípio: não sou responsável por aquilo que as outras pessoas julgam que sou capaz de fazer; não tenho de ser bom porque pensam que vou ser bom. De certo modo, consegui

relaxar sobre o assunto e pensei para comigo mesmo que não tinha feito nada de importante e que nunca iria fazer nada de importante, mas gostava das coisas da física e da matemática e, como brincava com elas, resolvi rapidamente aquilo que mais tarde me deu um prémio Nobel[6].

O prémio Nobel — valeu a pena?

[Feynman recebeu o Prémio Nobel pelo seu trabalho em electrodinâmica quântica.] Essencialmente, aquilo que fiz — e que também foi feito, independentemente, por outras duas pessoas, [Sin-Itiro] Tomonaga, no Japão, e [Julian] Schwinger — foi descobrir como controlar, analisar e discutir a teoria quântica original da electricidade e do magnetismo que tinha sido escrita em 1928, como interpretá-la de modo a evitar as infinidades e fazer cálculos com resultados sensatos e que desde então têm estado de acordo com cada uma das experiências feitas até agora, de modo que a electrodinâmica quântica concorda com a experiência em cada pormenor onde é aplicável — não envolvendo as forças nucleares, por exemplo —, foi este o trabalho que fiz em 1947, descobrir como fazê-lo, e que me deu o prémio Nobel.

[ENTREVISTADOR] — *E valeu o prémio Nobel?*

Como *[risos]*... não sei nada sobre o prémio Nobel, não percebo do que se trata, ou o que vale o quê, e, se as pessoas na Academia Sueca decidem que x, y ou z ganha

---

[6] Em 1965, o Prémio Nobel da Física foi partilhado por Richard Feynman, Julian Schwinger e Sin-Itiro Tomonaga pelo seu trabalho extraordinário na electrodinâmica quântica e suas profundas consequências para a física das partículas elementares.

o prémio Nobel, assim seja. Não tenho nada a ver com o prémio Nobel... é uma... *[risos]*. Não gosto de honras, aprecio-o pelo trabalho que fiz e pelas pessoas que o apreciam e sei que há muitos físicos que usam o meu trabalho; não preciso de mais nada, creio que nada mais faz sentido, não vejo que faça diferença que alguém na Academia Sueca decida que este trabalho é suficientemente nobre para receber um prémio — já tenho o prémio. O prémio é o prazer da descoberta, a excitação da descoberta, ver que outras pessoas o usam [o meu trabalho] — estas são as coisas reais, as honras são irreais para mim. Não acredito em honras, aborrecem-me, as honras aborrecem, as honras são galões, as honras são uniformes. O meu pai criou-me desta maneira, não consigo suportá-lo, ferem-me. Quando andava no liceu, uma das primeiras honras que recebi foi ser membro do Arista, um grupo de miúdos que tinham boas notas; toda a gente queria ser membro do Arista, e quando entrei descobri que o que se fazia nas reuniões era discutir quem mais era merecedor de pertencer a esse maravilhoso grupo além de nós, OK? Então sentávamo-nos para tentarmos decidir a quem é que seria permitido juntar-se a este Arista. Este tipo de coisa perturba-me psicologicamente por uma razão ou por outra que não compreendo e desde esse dia sempre me perturbou. Tinha problemas com... quando me tornei membro da Academia Nacional de Ciências, acabei por ter de renunciar porque essa é outra organização cuja maior parte do tempo é passada na escolha de quem é suficientemente ilustre para aderir, para ser autorizado a juntar-se a nós na organização, incluindo questões sobre se nós, os físicos, devíamos manter-nos unidos, porque eles têm um químico muito bom que estão a tentar incluir e não há espaço que chegue, e por aí fora. Qual é o problema com os químicos? A coisa toda estava podre porque o seu propósito

principal era decidir quem é que podia ter esta honra, OK? Não gosto de honras.

As regras do jogo

[De 1950 a 1988, Feynman foi professor de Física Teórica no Instituto de Tecnologia da Califórnia (Caltech).] Uma analogia engraçada para dar uma ideia do que fazemos nesta tentativa de compreendermos a natureza é imaginar que os deuses estão a jogar um grande jogo, tipo xadrez, e que não sabemos as regras do jogo, mas nos é permitido olhar para o tabuleiro de vez em quando, talvez para um pequeno canto, e, a partir destas observações, tentamos perceber quais são as regras das peças que se movimentam. Após algum tempo podemos descobrir que, por exemplo, quando só há um bispo no tabuleiro este mantém a sua cor. Mais tarde podemos descobrir a lei para o bispo, à medida que se movimenta na diagonal, o que explicaria a lei anterior e por que não perdeu a sua cor, e isso seria análogo a descobrir uma lei e depois encontrar-lhe um significado mais profundo. Então as descobertas acontecem, tudo parece estar a correr bem, temos todas as leis, parece óptimo, mas, de repente, ocorre um fenómeno estranho qualquer num canto e começamos a investigá-lo, a procurá-lo — é perturbador, algo de que não estávamos à espera. Já agora, nós, na física fundamental, estamos sempre a tentar investigar aquelas coisas cuja conclusão não compreendemos. Não estamos a verificar as nossas conclusões a toda a hora; depois de as termos confirmado o suficiente ficamos satisfeitos.

Aquilo que não bate certo, a parte que não se comporta de acordo com o previsto, é aquilo que é mais interessante. Podemos ter revoluções em física depois de termos

verificado que o bispo mantém a cor e se move na diagonal, e durante muito tempo toda a gente sabe que é assim, quando de repente, num jogo qualquer de xadrez, se percebe que o bispo não manteve a cor, que a cor muda. Só mais tarde descobrimos outra possibilidade, que um bispo é capturado e que um peão vai até ao extremo onde está a rainha para produzir um novo bispo — isso pode acontecer, mas não o sabíamos e por isso é tão semelhante ao modo como são as nossas leis: por vezes parecem bem e continuam a funcionar até que, de repente, uma luzinha mostra que estão erradas e lá temos de investigar as condições sob as quais o bispo mudou de cor e, gradualmente, aprendemos a nova regra que o explica de modo mais profundo. No entanto, ao contrário do xadrez, em que as regras vão ficando mais complicadas à medida que se avança, na física, à medida que se descobrem coisas novas, começa tudo a parecer mais simples. Em geral, parece mais complicado porque aprendemos a partir de uma experiência maior — quer dizer, aprendemos novas partículas e novas coisas — e por isso as leis parecem complicadas outra vez. Mas, se não nos esquecermos do que é maravilhoso e aumentarmos a nossa experiência para regiões cada vez mais audazes, de vez em quando temos aquelas integrações em que tudo se junta num todo e se torna mais simples do que parecia antes.

Se estivermos interessados na essência do mundo físico, da realidade ou na visão completa do mundo e, de momento, a única via para o compreendermos for o pensamento matemático, então acho que ninguém pode apreciar totalmente, ou mesmo parcialmente, estes aspectos particulares do mundo, a grande profundidade do carácter universal das leis, as relações entre as coisas, sem compreender a matemática. Acho que é, não sei, não conheço

qualquer outro modo de o fazer, não conhecemos outra maneira de o descrever com rigor... ou mesmo de ver as inter-relações. Por isso não acredito que uma pessoa que não tenha desenvolvido algum conhecimento matemático seja capaz de apreciar este aspecto do mundo — não me interpretem mal, existem muitos, muitos aspectos do mundo para os quais a matemática não é necessária, como o amor, que são maravilhosos de apreciar e de sentir o fascínio e mistério, e não quero dizer que a física é a única coisa no mundo, mas estávamos a falar de física e, se é disso que falamos, então não saber matemática é uma severa limitação à compreensão do mundo.

Esmagar átomos

Aquilo em que estou a trabalhar neste momento é um problema especial que se nos deparou e que vou descrever. Como se sabe, todas as coisas são feitas de átomos — já sabemos isso e a maioria das pessoas também — e o átomo tem um núcleo em volta do qual giram electrões. O comportamento dos electrões no exterior é hoje completamente conhecido e as leis que o regem são bem compreendidas, pelo menos que nós saibamos, nesta electrodinâmica quântica de que lhes falei. E depois de isso ter sido resolvido o problema passou a ser o de saber como é que o núcleo funciona, como é que as partículas interagem, como é que se mantêm unidas. Um dos resultados secundários foi descobrir a fissão e fazer a bomba. Mas investigar quais são as forças que mantêm as partículas nucleares unidas era uma longa tarefa. No princípio pensou-se que era uma troca de um tipo de partículas no interior, que foram inventadas por Yukawa, chamadas piões, e previu-se que, se se disparassem protões — o protão é uma das partículas

do núcleo — contra o núcleo, eles atingiriam certamente essas partículas e elas saltariam.

Não foram apenas os piões que saltaram, mas muitas outras partículas, e começámos a ficar com falta de nomes — kaões, sigmas, lambdas, etc.; agora chamam-se hadrões, e, à medida que aumentámos a energia da reacção, obtivemos cada vez mais tipos diferentes, até serem centenas, e então o problema — este período foi de 1940-1950 até hoje — foi encontrar o padrão por trás disto (e parecem existir muitas relações e padrões interessantes entre as partículas) até que uma teoria evoluiu para explicar estes padrões, que todas estas partículas eram de facto feitas de outra coisa, que eram feitas de quarks — três quarks, por exemplo, formam um protão (o protão é uma das partículas do núcleo, outra é o neutrão). Existe uma variedade de quarks — na verdade, inicialmente eram necessários apenas três para explicar as centenas de partículas e os diferentes tipos de quarks, o tipo *u*, o tipo *d* e o tipo *s*. Dois *u* e um *d* fazem um protão e dois *d* e um *u* um neutrão. E, se se moverem de modo diferente no interior, formam outra partícula, e por aí fora. Surgiu então o problema: qual é exactamente o comportamento dos quarks e o que é que os mantém unidos? E arranjou-se uma teoria muito simples, uma analogia muito próxima da electrodinâmica quântica — não exactamente a mesma coisa, mas muito próxima —, em que os quarks são como o electrão e os fotões, que circulam entre os electrões e os fazem atrair-se electricamente, funcionam como as partículas chamadas gluões. A matemática era muito semelhante, mas havia alguns termos ligeiramente diferentes. As diferenças na forma das equações foram intuídas com princípios de uma tal beleza e simplicidade que não foram arbitrárias, mas sim muito e muito determinadas. O que é arbitrário é o número de diferentes tipos de quarks que há, e não a natureza da força entre eles.

Agora há algo diferente da electrodinâmica, podendo dois electrões ser afastados tanto quanto quisermos (na verdade, quando estão muito longe, a força é enfraquecida); se isto fosse verdade para os quarks, esperar-se-ia que nas colisões fortes os quarks saltassem. Mas, em vez disso, quando fazemos uma experiência com energia suficiente para retirar os quarks, encontramos um grande jacto — isto é, as partículas a irem todas na mesma direcção, como os velhos hadrões, sem quarks. E da teoria percebe-se que o que acontece é que, à medida que os quarks saem, se formam novos pares, que aparecem em pequenos grupos, formando os hadrões.

A questão é saber por que é tão diferente da electrodinâmica, como é que estas pequenas diferenças nos termos, estes pequenos termos que são diferentes nas equações, produzem efeitos tão díspares, tão completamente distintos. De facto, foi muito surpreendente para a maioria das pessoas que isto fosse mesmo assim; primeiro pensava-se que a teoria estaria errada, mas, quanto mais se estuda, mais claro se torna que é muito possível que estes termos extra produzam esses efeitos. Também nós estávamos num momento da história que era diferente de qualquer outra época da física. Tínhamos uma teoria, uma teoria completa e definida de todos estes hadrões, e uma quantidade enorme de experiências e montes e montes de pormenores: então por que é que não testamos a teoria de uma vez para vermos se está certa ou errada? Porque o que temos de fazer é calcular as consequências e aquilo que acontece, se a teoria estiver certa, é muito difícil de compreender. A matemática necessária para o fazer era, na altura, insuperavelmente difícil. Eram os tempos, certo? E, portanto, é óbvio que o meu problema é arranjar uma maneira de sacar números desta teoria, testá-la cuidadosamente, não apenas qualitativamente, para ver se dará o resultado certo.

Passei alguns anos a tentar inventar objectos matemáticos que me permitissem resolver as equações, mas não cheguei a lado nenhum, e decidi então que para o fazer tinha de perceber mais ou menos o aspecto provável da resposta. É difícil de explicar, mas tinha de ter uma ideia qualitativa do modo como o fenómeno funciona antes de conseguir uma boa ideia quantitativa. Por outras palavras, as pessoas nem sequer percebiam grosseiramente como é que funcionava, pelo que passei o último ano, ou dois, a trabalhar na compreensão básica disto, ainda não quantitativa, com a esperança de que no futuro se transforme num refinado instrumento matemático ou algoritmo para chegar da teoria às partículas. Estamos numa posição engraçada, percebem? Não é que estejamos à procura da teoria, já a temos — uma candidata muito, muito boa —, mas estamos naquele passo da ciência em que precisamos de a comparar com a experiência, verificando quais são as consequências. Estamos encalhados aqui e é meu objectivo e desejo conseguir resolver isto *[risos]*. É uma posição um bocado louca para se estar, ter uma teoria cujas consequências não se conseguem vislumbrar... não o suporto, tenho de resolver isto. Quem sabe, um dia.

Deixa o George fazê-lo

Para fazer física de nível, realmente boa, é preciso ter períodos de tempo sólidos, de modo que, quando estamos a reunir ideias vagas e difíceis de recordar, tenhamos a mesma sensação de quando construímos castelos de cartas e cada uma delas abana e, se esquecemos alguma, a coisa colapsa toda outra vez. Não sabemos como é que chegámos lá e é preciso construir tudo de

interessa e que pusemos aquilo de pé e é uma grande torre que escorrega facilmente; é necessária muita concentração — isto é, tempo para pensar — e, se também temos tarefas de administração, então não temos o tempo sólido. Daí que eu tenha inventado outro mito para mim mesmo — que sou irresponsável. Digo a toda a gente que não faço nada. Se alguém me pede para estar num comité para tratar das admissões, a resposta é não, sou irresponsável, não ligo nenhuma aos alunos — é claro que quero saber deles, mas também sei que qualquer outra pessoa vai fazê-lo, por isso adopto a posição de «deixa o George fazê-lo», algo que não é suposto fazer-se, OK, porque não está certo, mas faço-o porque gosto muito de física e quero ver se ainda consigo fazê-la, logo sou egoísta, OK, mas quero fazer a minha física.

Aborrecido pela história

Os alunos estão todos na aula. Agora perguntam-me como é que devo ensiná-los. Devo fazê-lo do ponto de vista da história da ciência ou das aplicações? A minha teoria é que a melhor maneira de ensinar é não ter filosofias, ser caótico e baralhar tudo, na medida em que se usam todas as maneiras possíveis de o fazer. É a única maneira que vejo de responder. Agarrar este aqui e aquele ali com diferentes iscos à medida que se avança, de modo que enquanto um que se interessa por história se aborrece com a matemática abstracta, outro que gosta de abstracções se aborrece com a história — se conseguirmos fazer

isto e não os maçar todos ao mesmo tempo, talvez seja o melhor. Realmente não sei como fazê-lo. Não sei responder a esta pergunta dos diferentes tipos de mentes com interesses distintos, aquilo que os agarra, o que os interessa ou como conseguir que se interessem. Uma maneira possível é à força: tens de passar nesta disciplina, tens de fazer este exame. É muito eficaz, muita gente faz a escola desta maneira, talvez seja a mais eficaz. Desculpem, depois de muitos e muitos anos a tentar ensinar e a experimentar toda uma variedade de métodos, realmente não sei como fazê-lo.

Tal pai, tal filho

Quando era miúdo, entusiasmava-me quando o meu pai me contava coisas; por isso tentei contar ao meu filho coisas interessantes sobre o mundo. Quando ele era muito pequenino, costumávamos arrastá-lo para a cama e contar-lhe histórias; inventava uma sobre pessoas pequeninas, que eram mais ou menos deste tamanho, que faziam piqueniques e viviam no ventilador e passeavam nestas matas que tinham umas coisas altas e azuis, como árvores, mas sem folhas e apenas um pé, e tinham de andar por entre elas. Gradualmente, ele percebia que isso era a manta, uma manta azul, e adorava este jogo porque lhe descrevia as coisas de um ponto de vista esquisito e gostava de ouvir as histórias e chegávamos a uma série de coisas maravilhosas — ele chegou a entrar numa cave húmida onde o vento estava sempre a entrar e a sair; entrava frio e saía quente. Era dentro do nariz do cão, e é claro que deste modo podia explicar-lhe fisiologia e outras coisas. Ele adorava isto, contei-lhe um monte de coisas e também me diverti porque estava a contar-lhe coisas de que gostava e

divertíamo-nos a adivinhar o que era. Quando tive uma filha tentei fazer a mesma coisa, mas, bem, a personalidade da minha filha era diferente, ela não queria ouvir esta história, queria que lhe contasse a história do livro, repetida e relida para ela. Queria que lesse, e não que inventasse histórias, é uma personalidade diferente. Portanto, posso dizer que um método óptimo de ensinar ciência a crianças é inventar histórias sobre pessoas pequeninas, mas a verdade é que não funcionou com a minha filha e aconteceu funcionar com o meu filho, OK?

Ciência que não é ciência...

Por causa do sucesso da ciência, existe, acho eu, uma espécie de pseudociência. A ciência social é um exemplo de uma ciência que não é de facto uma ciência. Não fazem as coisas cientificamente; seguem a forma — reúnem os dados, fazem isto e aquilo, mas não obtêm quaisquer leis, não descobrem nada. Ainda não chegaram a lado nenhum, talvez um dia cheguem, mas não está muito bem desenvolvida. Porém, o que acontece é a um nível ainda mais mundano. Temos especialistas de qualquer coisa, desde que os faça parecer que são especialistas científicos. Não são científicos, sentam-se à frente de uma máquina de escrever e inventam qualquer coisa, como, bem, alimentos cultivados com fertilizantes orgânicos são melhores do que alimentos cultivados com fertilizantes inorgânicos — talvez seja verdade, talvez não, mas não foi demonstrada uma maneira ou outra. Mas sentam-se à máquina e inventam estas tralhas todas como sendo ciência e então tornam-se especialistas em alimentação, alimentação orgânica e tal. Há todo o tipo de mitos e pseudociência por todo o lado.

riências, quão fácil é cometer erros e enganar-se. Eu sei o que significa saber alguma coisa; por isso vejo como é que obtêm a informação e não posso acreditar no seu saber, não tiveram o trabalho necessário, não verificaram o suficiente, não tiveram cuidado suficiente. Tenho uma forte suspeita de que não sabem, que estas coisas estão erradas e que são pessoas intimidantes. Penso isso. Não conheço muito bem o mundo, mas é isto que penso.

Dúvida e incerteza

Se estavam à espera de que a ciência desse todas as respostas às perguntas maravilhosas de quem somos, para onde vamos, qual é o significado do universo, etc., então acho que facilmente se podem desiludir e procurar respostas místicas para estes problemas. Como é que um cientista pode aceitar uma resposta mística, não sei, porque o espírito é compreender — bem, deixem lá isso. Em todo o caso, não o compreendo, mas, se pensarem nisso, o modo como vejo aquilo que estamos a fazer é que estamos a explorar, a tentar descobrir o mais possível sobre o mundo. As pessoas perguntam-me: andas à procura das leis finais da física? Não, não ando, estou apenas a procurar descobrir mais sobre o mundo e, se acontecer existir uma simples teoria final que explique tudo, seja, seria muito bom descobri-la.

Se verificarmos que é como uma cebola com milhões de camadas e estivermos fartos de olhar para as camadas, então é porque é assim, mas, seja como for, é a natureza

que ali está e aparecerá tal como é; logo, quando a vamos investigar não devemos pré-decidir o que é que vamos fazer, excepto tentar descobrir mais acerca disso. Mas, se pensarmos que estamos a investigar por que vamos obter a resposta para uma questão filosófica profunda, então podemos estar errados. Até pode ser que não consigamos obter uma resposta para essa pergunta em particular através do conhecimento do carácter da natureza. Mas não encaro isso assim. O meu interesse pela ciência é simplesmente descobrir mais acerca do mundo e, quanto mais eu descobrir, melhor se torna fazê-lo.

Existem mistérios extraordinários no facto de sermos capazes de fazer muito mais coisas do que os animais aparentemente conseguem, e existem outras questões como esta, mas esses são mistérios que quero investigar sem conhecer a resposta. Por isso, em geral, não posso acreditar nas histórias que foram inventadas sobre a nossa relação com o universo porque me parecem demasiado simples, demasiado ligadas e locais, demasiado provincianas. A Terra, Ele veio à Terra, uma das aparências de Deus veio à Terra, prestem atenção, vejam o que está lá fora. Não está em proporção. No entanto, não vale a pena discutir, não discuto, estou só a tentar dizer-lhes por que é que as minhas opiniões científicas têm efeito na minha crença. Outra coisa é a maneira como descobrimos se algo é verdadeiro, e, se todas as religiões têm teorias diferentes acerca disso, então faz-nos pensar. Assim que se começa a duvidar, tal como é suposto ser feito, pergunta-se se a ciência é verdadeira. A resposta é que não sabemos o que é verdadeiro, estamos a tentar descobrir e é possível que esteja tudo errado. Comecemos por compreender a religião dizendo que é possível que esteja tudo errado e vejamos. Assim que se faz isso começa-se a escorregar numa encosta de que é difícil recuperar. Com a visão científica, ou a

visão do meu pai, devemos procurar ver o que pode ser ou não verdade e, quando começamos a duvidar, que para mim é uma parte fundamental da alma — duvidar e perguntar —, então, quando duvidamos e questionamos, torna-se um pouco mais difícil acreditar.

Sabem, é que eu posso viver com a dúvida e a incerteza e não saber. Acho que é muito mais interessante viver não sabendo coisas do que ter respostas que podem estar erradas. Tenho respostas aproximadas, crenças possíveis e diferentes graus de certeza sobre assuntos diferentes, mas não estou absolutamente certo de coisa nenhuma e existem muitas coisas sobre as quais não sei nada, tal como se significa alguma coisa questionarmos o porquê de estarmos aqui e o que a pergunta pode querer dizer. Posso pensar um bocadinho sobre isso e não o perceber, então sigo para outra coisa. Mas não tenho de saber a resposta e não fico assustado por não saber coisas, por estar perdido num universo misterioso sem ter um propósito, que é, aliás, o modo como ele é, tanto quanto posso dizer. Isso não me assusta.

2
Os computadores do futuro

Ironicamente, quarenta anos depois do dia seguinte ao do bombardeamento de Nagasáqui, Feynman, o veterano do projecto Manhattan, deu uma conferência no Japão, embora o tópico seja pacífico. É algo que ainda ocupa os pensamentos das mentes mais penetrantes: o futuro do computador, incluindo o assunto que fez Feynman parecer um Nostradamus da ciência da computação — o limite final do tamanho de um computador. Este capítulo pode ser um pouco difícil para muitos leitores, mas é uma contribuição de tal modo importante para a ciência que espero que reservem tempo para o lerem, mesmo que tenham de saltar por cima das partes mais técnicas. Termina com uma breve discussão de uma das ideias de estimação favoritas de Feynman, a qual lançou a revolução da nanotecnologia.

Introdução

É um grande prazer e uma honra estar aqui como orador em memória de um cientista que eu respeitava e admi-

para falar.

Gostava de começar por dizer aquilo sobre que não vou falar. Quero falar das máquinas de computação do futuro, mas os desenvolvimentos possivelmente mais importantes do futuro são algo de que não falarei. Por exemplo, existe muito trabalho feito para tentar desenvolver máquinas mais inteligentes, máquinas que têm uma melhor relação com os humanos, de modo que as entradas e saídas possam ser feitas com menos esforço do que a programação complexa que é necessária hoje em dia. Isto é normalmente referido como inteligência artificial, mas não gosto desse nome. Talvez as máquinas não inteligentes possam até fazer melhor do que as inteligentes. Outro problema é a standardização das linguagens de programação. Hoje existem demasiadas linguagens e seria uma boa ideia escolher apenas uma. (Hesitei em mencionar isto no Japão porque o que vai acontecer é que haverá mais linguagens-padrão — já têm quatro modos de escrita e as tentativas para normalizar o que quer que seja aqui resultam aparentemente em mais padrões, e não em menos!)

Outro problema interessante do futuro em que vale a pena trabalhar, mas de que não vou falar, são os programas automáticos de limpeza de falhas. Quer dizer, corrigir erros num programa ou numa máquina, o que é surpreendentemente difícil de fazer à medida que os programas ficam mais complicados. Outra direcção para o melhoramento é construir máquinas tridimensionais, em vez de as colocar na superfície de um *chip*. Tal pode ser feito por fases, e não tudo de uma vez — podemos ter várias camadas e adicionar mais com o tempo. Outro dispositivo

importante seria algo que detectasse automaticamente elementos defeituosos num *chip;* o *chip* então reformulava-se a si próprio de modo a evitar os defeitos. Actualmente, quando tentamos fazer *chips* grandes, ocorrem muitas vezes falhas ou regiões defeituosas, pelo que deitamos fora o *chip* inteiro. Se conseguíssemos fazê-lo de modo a aproveitarmos a parte do *chip* que ainda funciona, seria muito mais eficiente. Menciono estas coisas para tentar dizer-lhes que estou consciente dos problemas reais das máquinas do futuro. Mas aquilo de que quero falar é simples, apenas algumas pequenas questões técnicas que, em princípio, podem ser feitas de acordo com as leis físicas. Por outras palavras, gostaria de discutir a maquinaria, e não o modo como utilizamos as máquinas.

Vou falar de algumas possibilidades técnicas para construir máquinas. Haverá três tópicos. Um são as máquinas de processamento paralelo, que é algo do futuro próximo, quase do presente, que está a ser desenvolvido agora. Mais à frente no futuro está a questão do consumo energético das máquinas, que no momento parece ser uma limitação, mas realmente não é. Finalmente, vou falar acerca do tamanho. É sempre melhor fazer as máquinas mais pequenas e a questão é quão mais pequenas é possível, em princípio, construir as máquinas, de acordo com as leis da natureza? Não vou discutir qual ou quais destas coisas vão mesmo aparecer no futuro. Isso depende de problemas económicos e sociais e não vou tentar adivinhá-los.

Computadores paralelos

O primeiro tópico diz respeito aos computadores paralelos. Quase todos os computadores actuais, computadores convencionais, funcionam numa disposição ou arquitectura

inventada por von Neumann[7], em que há uma grande memória que armazena toda a informação e um local central que faz cálculos simples. Escolhemos um número na memória, outro número noutro local da memória, enviamos os dois para a unidade aritmética central, que os adiciona e envia o resultado para outro local da memória. Efectivamente, existe um único processador central que trabalha muito e muito depressa enquanto a memória fica ali, como um arquivador muito rápido de cartas que raramente são utilizadas. É óbvio que, se houvesse mais processadores a trabalhar ao mesmo tempo, seríamos capazes de fazer cálculos mais depressa. Mas o problema é alguém poder utilizar um processador que pode estar a usar informação da memória necessária para outro, o que se torna muito confuso. Por essa razão se tem dito que é muito difícil ter vários processadores a funcionar em paralelo.

Têm sido dados alguns passos nessa direcção nas grandes máquinas convencionais chamadas «processadores vectoriais». Por vezes, quando se quer realizar exactamente o mesmo passo em muitos itens diferentes, talvez seja possível fazê-lo ao mesmo tempo. A esperança está em que os programas normais possam ser escritos da maneira habitual e depois um programa de interpretação descubra automaticamente quando é que é favorável utilizar esta possibilidade vectorial. Esta ideia é utilizada no *Cray*[8] e nos supercomputadores no Japão. Outro plano é usar um grande número de computadores relativamente simples (mas não demasiado simples) e ligá-los todos segundo um

---

[7] John von Neumann (1903-1957), matemático húngaro/norte-americano, considerado um dos pais do computador.

[8] Referência a Seymor Cray, considerado o pai da supercomputação. O primeiro sistema *Cray* foi instalado no Laboratório Nacional de Los Alamos em 1976. *(N. da T.)*

padrão. Então poderiam todos trabalhar numa parte do problema. Cada um é, na verdade, um computador independente, mas transferem informação entre eles sempre que um deles precisa dela. Este tipo de esquema existe, por exemplo, no *Cubo Cósmico de Caltech* e é apenas uma de muitas possibilidades. Muitas pessoas estão hoje a construir máquinas destas.

Outro plano é distribuir por toda a memória um grande número de processadores muito simples. Cada um lida apenas com uma pequena parte da memória e existe um sistema elaborado de interligações entre eles. Um exemplo de uma máquina destas é a *Connection Machine* (máquina de conexão) feita no MIT. Tem 64 000 processadores e um sistema de direccionamento em que cada 16 podem comunicar com outros 16, havendo, portanto, 4000 possibilidades de direccionamento.

Poderia parecer que certos problemas científicos, como a propagação de ondas num dado material, seriam facilmente resolvidos pelo processamento paralelo. Isto acontece porque o que se passa em qualquer ponto do espaço em cada momento pode ser resolvido localmente, onde apenas é necessário conhecer as pressões e os constrangimentos dos volumes vizinhos. Isto pode ser resolvido ao mesmo tempo para cada volume e para as condições de fronteira comunicadas através dos diferentes volumes. É por isso que este tipo de *design* funciona para esses problemas. Verificou-se que um grande número de problemas de todos os tipos pode ser resolvido em paralelo. Desde que o problema seja suficientemente grande para que haja uma grande quantidade de cálculos, a computação paralela pode acelerar enormemente a solução, e este princípio não se aplica só a problemas científicos.

O que aconteceu ao preconceito de há dois anos de que a programação paralela era difícil? Acontece que o que era

computação paralela, e reescrever completamente o programa com uma nova atitude para com o que está dentro da máquina. Não é possível utilizar eficazmente os programas antigos. Isso é uma grande desvantagem para a maioria das aplicações industriais e tem encontrado uma forte resistência. Mas os grande problemas geralmente pertencem aos cientistas ou a outros programadores inteligentes, oficiosos, que adoram a computação e estão dispostos a começar de novo e a reescrever o programa para o tornarem mais eficiente. Por isso o que vai acontecer é que os programas pesados, aqueles enormes, serão os primeiros a serem reprogramados pelos especialistas e depois, gradualmente, toda a gente vai ter de o fazer. Então mais e mais programas serão feitos dessa maneira e os programadores terão de aprender como se faz.

Redução da perda de energia

O segundo tópico de que quero falar é da perda de energia nos computadores. O facto de necessitarem de serem arrefecidos é uma aparente limitação para os computadores maiores, já que é aplicado um grande esforço no arrefecimento da máquina. Gostava de explicar que isto é simplesmente o resultado de uma engenharia muito pobre e nada fundamental. Dentro do computador, cada *bit* de informação é controlado por um fio que tem uma voltagem de um certo valor. Chama-se *bit,* e temos de alterar a voltagem do fio de um valor para outro, pondo ou tirando carga. Faço uma analogia com a

água: precisamos de encher um recipiente com água para conseguirmos um nível ou de o esvaziar para conseguirmos outro. Isto é apenas uma analogia — se preferem a electricidade, podem pensar mais adequadamente em termos eléctricos.

O que fazemos, no caso da água, é encher o recipiente, vertendo água a partir de um nível superior (figura 2.1), ou baixar o nível, abrindo uma válvula no fundo e deixando escorrer a água. Em ambos os casos há uma perda de energia devido à descida súbita do nível da água de uma altura superior, por onde entra, para um nível inferior, por onde sai, e também quando se começa a encher novamente. Nos casos da voltagem e da carga acontece o mesmo.

É, como explicou Mr. Bennet, o que acontece quando um carro arranca, em que se liga o motor, e pára, em que se utilizam os travões. De cada vez que se liga o motor e se accionam os travões perde-se energia. Outra maneira de resolver as coisas para os carros é arranjá-los de modo que as rodas estejam ligadas ao volante do motor. Sempre que o carro pára, o volante acelera, poupando energia, que pode depois ser utilizada para ligar o carro novamente.

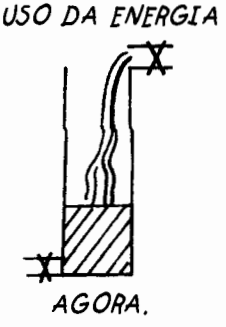


Figura 2.1

O análogo para o caso da água seria ter um tubo em forma de U com uma válvula no centro, ao fundo, ligando os dois braços do U (figura 2.2). Começamos com o braço direito cheio, o esquerdo vazio e a válvula fechada. Se agora abrirmos a válvula, a água vai passar para o outro lado, e podemos fechar a válvula outra vez, mesmo a tempo de apanharmos a água no braço esquerdo. Quando queremos que vá para o outro lado, abrimos a válvula outra vez e apanhamo-la novamente. Há sempre uma perda e a água nunca sobe tão alto como anteriormente, mas podemos corrigir isto adicionando mais um pouco de água, uma perda de energia muito menor do que no caso do enchimento directo. Este truque utiliza a inércia da água, sendo a indutância o análogo para a electricidade. No entanto, é muito difícil fazer indutância nos *chips* com os transístores de silício de hoje em dia, pelo que esta técnica não é particularmente prática, dada a tecnologia actual.

Outra maneira seria encher o tanque com uma fonte situada ligeiramente acima do nível da água, levantando a água à medida que enchemos o tanque (figura 2.3), de

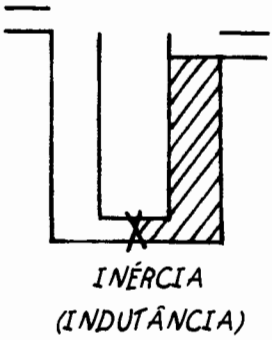
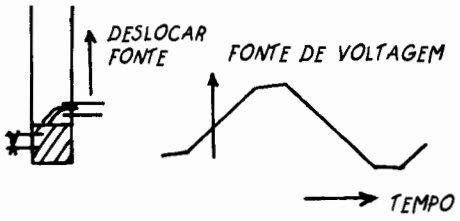


Figura 2.2

modo que a queda da água seria sempre menor durante todo o esforço. Do mesmo modo, poderíamos utilizar uma saída para baixar o nível no tanque, mas tirando água apenas perto do topo e baixando o tubo de modo que a perda de calor não aparecesse na posição do transístor, ou fosse menor. O verdadeiro volume da perda dependerá de quão grande seja a distância entre o fornecimento e a superfície, à medida que o enchemos. Este método corresponde a variar a voltagem com o tempo. Por isso, se conseguirmos utilizar uma fonte com uma voltagem que varie com o tempo, podemos usar este método. É claro que há uma perda de energia no fornecimento da voltagem, mas isso acontece tudo no mesmo sítio e é fácil haver aí uma grande indutância. Este esquema chama-se *hot clocking* porque a fonte de voltagem opera ao mesmo tempo que o relógio que cronometra tudo. Para além disso, não precisamos de um relógio extra para cronometrar os circuitos, tal como acontece nos *designs* convencionais.

Ambos estes dispositivos utilizam menos energia se funcionarem mais lentamente. Se tentarmos mover o nível da fonte de água demasiado depressa, a água no tubo não o



FONTE DE VOLTAGEM VARIÁVEL
("HOT CLOCKING")
PERDA DE ENERGIA • TEMPO = CONSTANTE.

Figura 2.3

acompanha e acaba por haver uma queda no nível da água. Por isso para fazer com que o dispositivo funcione é preciso ir devagar. Do mesmo modo, o esquema do tubo em U não funcionará a menos que a válvula central consiga abrir e fechar mais depressa do que o tempo que a água demora a escorrer de um lado para o outro. Assim, os dispositivos têm de ser lentos — salvamos a perda de energia, mas fica tudo mais lento. Na verdade, a perda de energia multiplicada pelo tempo que leva a operar o circuito é constante. Porém, apesar de tudo, isto acaba por ser muito prático, porque o tempo cronometrado é normalmente muito superior ao tempo de circuito para os transístores, e podemos utilizar isso para diminuir a energia. Também, se andarmos, digamos, três vezes mais devagar com os nossos cálculos, podemos utilizar um terço da energia sobre três vezes o tempo, o que é nove vezes menos potência que necessita de ser dissipada. Talvez valha a pena. Redesenhando e utilizando computações paralelas ou outros dispositivos, talvez possamos demorar um pouco mais de tempo do que aconteceria à velocidade máxima do circuito, de modo a fazermos uma máquina maior que seja prática e ainda reduzirmos a perda de energia.

Para um transístor, a perda de energia multiplicada pelo tempo de operação é um produto de vários factores (figura 2.4):

1. A energia térmica proporcional à temperatura, kT;
2. O comprimento do transístor, entre a fonte e a saída, dividido pela velocidade dos electrões no interior (velocidade térmica $\sqrt{3kT/m}$);
3. O comprimento do transístor em unidades da distância média para colisões de electrões no transístor;
4. O número total de electrões que estão no interior do transístor em operação.

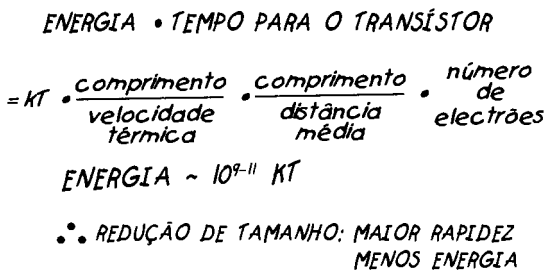


Figura 2.4

Substituindo por valores apropriados todos estes números, vemos que a energia utilizada nos transístores de hoje está algures entre mil milhões e 10 mil milhões ou mais vezes a energia térmica kT. Quando o transístor liga, utilizamos essa mesma energia. Isto é uma quantidade de energia enorme. É, obviamente, uma boa ideia reduzir o tamanho do transístor. Diminuímos o comprimento entre a fonte e a saída e podemos diminuir o número de electrões, logo utilizar muito menos energia. Também se verifica que um transístor mais pequeno é muito mais rápido, já que os electrões podem atravessá-lo mais depressa. Por todas as razões, é uma boa ideia fazer o transístor mais pequeno e toda a gente está a tentar consegui-lo.

Mas suponhamos que chegamos a uma altura em que a distância média é maior do que o tamanho do transístor; então descobrimos que o transístor já não funciona bem. Não se comporta do modo que esperávamos. Isto lembra-me que há muitos anos havia uma coisa chamada barreira do som. Era suposto os aviões não conseguirem viajar mais depressa do que a velocidade do som porque, se os desenharmos normalmente e depois tentarmos incluir a velocidade do som nas equações, o propulsor não funciona e as asas não aguentam e nada funciona correctamente. No entanto, os aviões podem viajar mais depressa do que a

velocidade do som. Só é preciso saber que as leis correctas funcionam nas circunstâncias adequadas e desenhar o dispositivo com elas. Não se pode esperar que *designs* antigos funcionem nas novas circunstâncias. Mas os novos *designs* podem trabalhar nas novas circunstâncias e acho que é perfeitamente possível fazer sistemas de transístores ou, mais correctamente, sistemas de computação, em que as dimensões são inferiores à distância média. Falo, é claro, «em princípio», e não estou a falar da verdadeira manufactura desses aparelhos. Vamos então discutir o que acontece quando tentamos fazer máquinas o mais pequenas possível.

Redução do tamanho

Assim, o meu terceiro tópico é o tamanho dos elementos de computação e vou falar agora do ponto de vista exclusivamente teórico. A primeira coisa com que temos de nos preocupar quando as coisas se tornam muito pequenas é com o movimento browniano[9] — está tudo a agitar-se e nada fica no seu lugar. Então como é que se podem controlar os circuitos? Mais, se um circuito está a funcionar, não haverá a possibilidade de, acidentalmente, voltar para trás? Se utilizarmos 2 volts para a energia deste sistema eléctrico, que é o normal (figura 2.5), isso é oito vezes a energia térmica à temperatura ambiente (kT = 1/40 volt) e a probabilidade de que alguma coisa reaja contra 80 vezes a energia térmica é e, a base do logaritmo natural, elevado

[9] Os movimentos espasmódicos das partículas causados pela colisão constante de moléculas ao acaso, observados em primeira mão por Robert Brown e explicados por Albert Einstein num artigo de 1905 na revista *Annalen der Physik*.

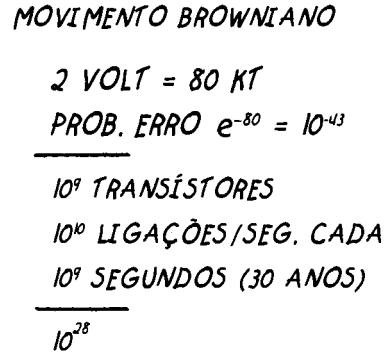


Figura 2.5

a menos oitenta, ou 10^{-43}. O que é que isto significa? Se tivéssemos mil milhões de transístores num computador (que ainda não temos), todos eles ligando-se 10^{10} vezes por segundo (um tempo de um décimo de nanossegundo), em funcionamento permanente durante 10^9 segundos (o que daria trinta anos), o número total de operações nessa máquina seria de 10^{28}. A probabilidade de um dos transístores reverter é de apenas 10^{-43}, pelo que não ocorrerão quaisquer erros produzidos por oscilações térmicas em trinta anos. Se não gostam assim, usem 2,5 volts e então a probabilidade será ainda mais reduzida. Muito antes disso surgirão verdadeiras falhas quando um raio cósmico acidentalmente atravessar o transístor, pelo que não temos de ser mais perfeitos do que isso.

No entanto, é de facto possível muito mais e gostava de lhes referir um artigo publicado recentemente na *Scientific American* por C. H. Bennet e R. Landauer, «Os limites físicos fundamentais da computação»[10]. É possível cons-

[10] *Sci. Am.*, Julho de 1985; trad. japonesa SAIENSU, Setembro de 1985.

truir um computador em que cada elemento — cada transístor — siga em frente e, mesmo que regrida acidentalmente, o computador continue a funcionar. Todas as operações no computador podem seguir em qualquer dos sentidos. A computação segue num sentido durante algum tempo e depois desfaz-se a si própria, «descalculando-se», seguindo novamente, e assim sucessivamente. Com alguma pressão podemos conseguir que o computador siga e termine o cálculo, fazendo com que seja apenas ligeiramente mais provável seguir em frente do que voltar atrás.

Sabe-se que todas as computações possíveis são feitas juntando elementos simples, como os transístores. Ou então, se queremos ter uma lógica mais abstracta, algo chamado uma porta NAND (significa NOT-AND), por exemplo. Uma porta NAND tem duas entradas e uma saída. Esqueçamos o NOT por um momento. O que é uma porta AND? É um dispositivo cuja saída é 1 quando ambas as entradas são 1; de outro modo é 0. NOT-AND significa o contrário; logo, a saída é 1 (isto é, tem o nível de voltagem correspondente a 1), a menos que ambas as entradas sejam 1; se ambas as entradas forem 1, então a saída será 0 (isto é, tem o nível de voltagem correspondente a 0). A figura 2.6 mostra uma pequena tabela de entradas e saídas para uma porta NAND. A e B são entradas e C é saída. Se A e B são ambas 1, a saída é 0 ou, de outro modo, 1. Mas este dispositivo é irreversível: a informação perde-se. Se apenas conhecermos a saída, não podemos recuperar a entrada. Logo, não se espera que a computação siga em frente, volte para trás e continue correctamente. Por exemplo, se soubermos que o resultado é 1, não sabemos se veio de $A = 0$, $B = 1$ ou $A = 1$, $B = 0$ ou $A = 0$, $B = 0$. Isto é uma porta irreversível. A grande descoberta de Bennet e, independentemente, de Fredkin é que é possível computar com um tipo diferente de porta

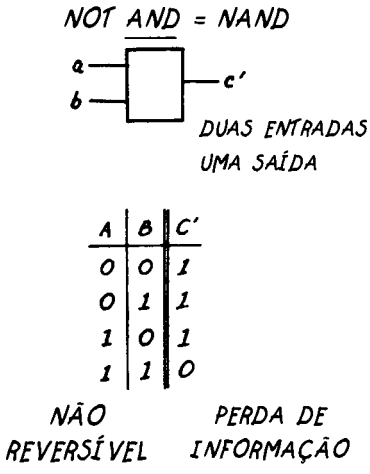


Figura 2.6

fundamental, nomeadamente uma porta reversível. Ilustrei a ideia deles com uma unidade à qual posso chamar uma porta NAND reversível. Tem três entradas e três saídas (figura 2.7). Das saídas, duas, A' e B', são as mesmas que duas das entradas, A e B, enquanto a terceira saída funciona do seguinte modo: C' será a mesma que C, a menos que A e B sejam ambas 1, caso em que C' muda qualquer que seja C. Por exemplo, se C for 1, é alterada para 0, se C for 0, é alterada para 1 — mas estas alterações apenas ocorrem se A e B forem ambas 1.

Se colocarmos duas destas portas em sucessão, veremos que A e B seguem e que, se C não for alterada em ambas, fica na mesma. Se C mudar, muda duas vezes, pelo que fica na mesma. Por isso esta porta pode reverter-se a si própria e nenhuma informação é perdida. É possível saber o que entrou uma vez sabendo o que saiu. Um dispositivo feito inteiramente com estas portas fará cálculos se tudo estiver a seguir em frente. Mas, se algo anda para trás e para a

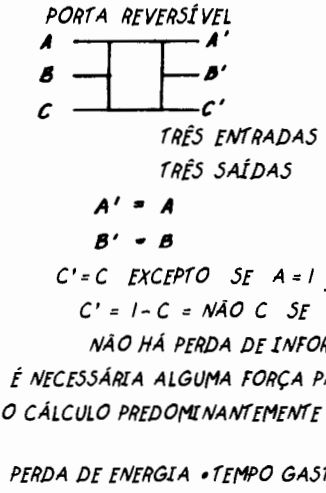


Figura 2.7

frente durante algum tempo e eventualmente segue suficientemente em frente, ainda opera correctamente. Se as coisas revertem e mais tarde seguirem, ainda estará tudo correcto. É semelhante a uma partícula num gás que é bombardeada pelos átomos à sua volta. Esta partícula geralmente não segue para lugar algum, mas com uma pequena ajuda, uma pequena premissa que faça com que a probabilidade de movimento num sentido seja superior a outro, haverá uma lenta progressão nesse sentido e a partícula viajará de um lado para o outro, apesar do movimento browniano. Assim, o nosso computador funcionará desde que apliquemos uma força motriz que o pressione para o cálculo. Embora não seja um comportamento suave calcular desta maneira, para a frente e para trás, acaba por cumprir a função. Tal como a partícula no gás, se a pressionarmos ligeiramente, perdemos muito pouca energia, mas leva muito tempo a chegar de um lado ao outro. Se estivermos com pressa e a pressionarmos com força, então perdemos muita energia. Pas-

sa-se o mesmo com este computador. Se formos pacientes e seguirmos lentamente, podemos operar o computador sem que haja praticamente perda de energia, ainda menos do que kT por passo, na verdade, se tivermos tempo suficiente, qualquer valor, por mais pequeno que seja. Mas com pressa é preciso dissipar energia e mais uma vez se verifica que a energia gasta para fazer o cálculo, multiplicada pelo tempo que demora, é constante.

Com estas possibilidades em mente, vamos ver quão pequeno é que podemos fazer um computador. Quão grande terá de ser um número? Todos sabem que é possível escrever números na base 2, como sequências de *bits*, cada um 0 ou 1. E o átomo seguinte será 1 ou 0, de modo que uma pequena sequência de átomos é suficiente para representar um número, um átomo para cada *bit*. Na verdade, uma vez que um átomo pode ter mais de dois estados, podemos utilizar ainda menos átomos, mas um por *bit* já é suficientemente pequeno!

Assim, por prazer intelectual, vamos ver se é possível construir um computador em que a escrita dos *bits* seja de tamanho atómico, em que cada *bit* seja, por exemplo, o *spin* para cima para o 1 e para baixo para o 0. Então o nosso «transístor», que altera os *bits* em diferentes locais, corresponderá a uma interacção entre os átomos que alterará os seus estados. O exemplo mais simples seria se uma interacção de 3 átomos fosse o elemento fundamental ou a porta nesse computador. Mas, novamente, o aparelho não funcionará como deve ser se o desenharmos com as leis utilizadas para objectos grandes. Precisamos de usar as novas leis da física, as leis da mecânica quântica, que são apropriadas para o movimento atómico (figura 2.8).

Temos então de perguntar se os princípios da mecânica quântica permitem um arranjo de átomos tão pequeno quanto umas poucas de vezes o número de portas num

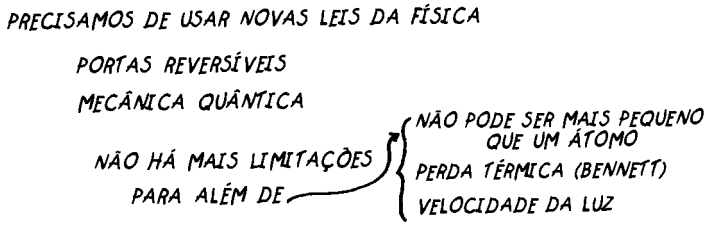


Figura 2.8

computador que possa operar como um computador. Isto foi estudado em teoria e já foi encontrado um tal arranjo. Uma vez que as leis da mecânica quântica são reversíveis, devemos utilizar a invenção de Bennet e de Fredkin das portas lógicas reversíveis. Quando esta situação é estudada, verifica-se que a mecânica quântica não traz quaisquer limitações a nada que o Sr. Bennet tenha dito sobre as considerações termodinâmicas. É claro que há uma limitação, uma limitação prática: que os *bits* sejam do tamanho de um átomo e de um transístor de 3 ou 4 átomos. A porta quântica que utilizei tem 3 átomos. (Não tentaria escrever os meus *bits* nos núcleos, esperaria até que o desenvolvimento tecnológico chegue aos átomos antes de precisar de ir mais longe!)

Isso deixa-nos apenas com: (*a*) as limitações de tamanho ao tamanho dos átomos; (*b*) as necessidades energéticas dependentes do tempo, como explicado por Bennet; (*c*) aquilo de que ainda não falei e que respeita à velocidade da luz — não podemos enviar sinais mais depressa do que a velocidade da luz. Estas são as únicas limitações físicas que conheço para os computadores.

Se, de algum modo, conseguíssemos fazer um computador de tamanho atómico, tal significaria que a dimensão (figura 2.9), a dimensão linear, seria mil a 10 000 vezes

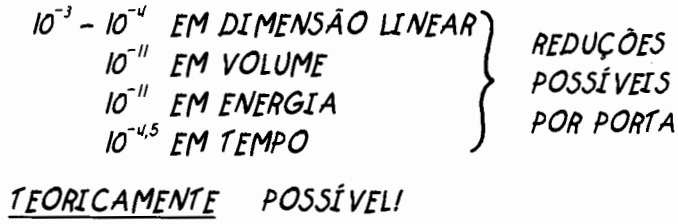


Figura 2.9

mais pequena do que aqueles *chips* muito pequeninos que temos agora. Significaria que o volume do computador seria 10^{-11} do volume actual, já que o volume do «transístor» seria 10^{-11} do volume dos transístores que hoje fabricamos. As necessidades energéticas para um único interruptor seriam cerca de 11 ordens de magnitude menores do que a energia necessária para ligar o transístor actual e o tempo para fazer as transições seria, pelo menos, 10 000 vezes menor por cada passo do cálculo. Por isso existem muitas possibilidades de melhoramento no computador e, com pessoas práticas que trabalham com computadores, deixo-lhes estes objectivos. Subestimei o tempo que o Sr. Ezawa levaria a traduzir as minhas palavras, pelo que não tenho mais nada preparado para hoje. Muito obrigado! Responderei a perguntas, se estiverem interessados.

Perguntas e respostas

P — Disse que um *bit* de informação podia ser armazenado num átomo e eu gostaria de saber se é possível guardar a mesma informação num quark.

R — Sim. Mas não temos o controlo dos quarks, pelo que se torna algo verdadeiramente impraticável lidar com estas coisas. Pode achar que aquilo de que estou a falar é

impraticável, mas não acredito que o seja. Quando falo de átomos, acredito que um dia vamos ser capazes de os manipular e controlar individualmente. Mas haveria tanta energia envolvida nas interacções dos quarks que seria muito perigoso manipulá-los devido à radioactividade, etc. No entanto, as energias atómicas de que estou a falar são-nos muito familiares em energias químicas e energias eléctricas e estes são números que estão no âmbito da realidade, creio, por mais absurdo que possam parecer neste momento.

P — Disse que, quanto menor fosse o elemento de computação, melhor, mas acho que o equipamento tem de ser grande porque...

R — Quer dizer que o seu dedo é demasiado grande para carregar nos botões? É isso?

P — Sim, é isso.

R — Claro que tem razão. Estou a falar de computadores internos, talvez para robôs ou outros aparelhos. Os dados de entrada e os resultados são algo que não discuti, seja a informação de entrada proveniente da visão de imagens, da audição de vozes ou dos botões que são pressionados. Estou a discutir como a computação é feita em princípio e não que forma é que os resultados devem tomar. É certamente verdade que tanto as entradas como os resultados não podem ser, na maioria dos casos, efectivamente reduzidos para além das dimensões humanas. Já é hoje muito difícil carregar nos botões de alguns computadores com os nossos dedos grandes. Mas, quando se trata de problemas de computação elaborados, que demoram horas e horas, estes podiam ser resolvidos muito rapidamente em máquinas muito pequenas, com baixo consumo de energia. É este o tipo de máquina em que estava a pensar, não na simples operação de adicionar dois números, mas em cálculos elaborados.

P — Gostaria de saber qual é o seu método para transformar a informação de um elemento da escala atómica para outro elemento da escala atómica. Se usasse uma interacção natural ou da mecânica quântica entre os dois elementos, então tal aparelho estaria muito próximo da própria natureza. Por exemplo, se fizermos uma simulação computacional, uma simulação de Monte Carlo de um magneto para estudar fenómenos críticos, então o seu computador à escala atómica estaria muito próximo do próprio magneto. Quais são os seus pensamentos acerca disto?

R — Sim, todas as coisas que fazemos são natureza. Arranjamo-las de uma maneira que sirva o nosso objectivo, para fazermos um cálculo com um propósito. Num magneto existe algum tipo de relação, se quiser, existem alguns tipos de computação a decorrer, tal como, de certo modo, há no sistema solar. Mas esse pode não ser o cálculo que queremos fazer neste momento. O que precisamos de fazer é um aparelho para o qual possamos mudar os programas e deixá-lo computar o problema que queremos resolver, não apenas o seu problema do magneto que gosta de resolver por si próprio. Não posso utilizar o sistema solar como computador a menos que, por acaso, o problema que alguém me deu seja encontrar o movimento dos planetas, caso em que apenas tenho de observar. Havia um artigo divertido, escrito como uma piada, em que no futuro aparecia um artigo que discutia um novo método para fazer cálculos aerodinâmicos: em vez de utilizar os computadores elaborados da altura, o autor inventa um simples aparelho para soprar ar nas asas (ele reinventa o túnel de vento!).

P — Li recentemente num jornal que as operações do sistema nervoso no cérebro são muito mais lentas do que os computadores do presente e que a unidade do sistema nervoso é muito mais pequena. Acha que os computadores

de que falou hoje têm alguma coisa em comum com o sistema nervoso no cérebro?

R — Há uma analogia entre o cérebro e o computador na medida em que há, aparentemente, elementos que podem ligar-se sob o controlo de outros. Impulsos nervosos que controlam ou excitam outros nervos de um modo que frequentemente depende da chegada de mais de um impulso — algo como uma porta AND ou a sua generalização. Qual é a quantidade de energia utilizada pela célula cerebral numa destas transições? Não sei. O tempo que demora a fazer uma ligação no cérebro é muito superior ao que acontece nos nossos computadores mesmo hoje, não falando ainda da sofisticação de um futuro computador atómico. Mas o sistema de interligações do cérebro é muito mais elaborado. Cada nervo está ligado a milhares de outros nervos, enquanto ligamos os transístores apenas a dois ou três outros.

Algumas pessoas observam a actividade do cérebro em acção e vêem que, em muitos aspectos, ultrapassa os computadores de hoje e, em muitos outros, os computadores ultrapassam-nos. Isto inspira as pessoas a conceberem máquinas que possam fazer mais. O que acontece frequentemente é que um engenheiro tem uma ideia do modo como o cérebro funciona (na sua opinião) e depois desenha uma máquina que se comporte como tal. Esta nova máquina pode até funcionar muito bem, mas devo avisá-los de que isso não nos diz nada acerca do modo como o cérebro funciona de facto, assim como não é necessário sabê-lo para fazer um computador muito capaz. Não é necessário compreender como é que os pássaros batem as asas e como são constituídas as penas para fazer uma máquina voadora. Não é preciso compreender o sistema de impulsão nas pernas de uma chita (um animal que corre muito depressa) para fazer um automóvel com rodas que

ande muito depressa. Logo, não é necessário imitar o comportamento da natureza em pormenor para construir um dispositivo que, de muitas maneiras, possa ultrapassar as capacidades da natureza. É um assunto interessante e gosto de falar sobre isto. O seu cérebro é muito fraco quando comparado com um computador. Vou dar-lhe uma série de números, um, três, sete... ou antes ichi, san, shichi, san, ni, go, ni, go, ichi, hachi, ichi, ni, ku, san, go. Agora quero que mos repita. Um computador pode contabilizar dezenas de milhares de números e repeti-los ao contrário, ou adicioná-los, ou fazer uma série de outras coisas que nós não conseguimos. Por outro lado, se olho para uma cara de relance, posso dizer-lhe quem é se conhecer a pessoa ou então que não conheço a pessoa. Ainda não sabemos como construir um sistema computacional tal que possa dar-nos essa informação se lhe dermos o padrão de uma cara, mesmo que já tenhamos visto muitas caras e tenhamos tentado ensiná-lo a fazê-lo.

Outro exemplo interessante são as máquinas que jogam xadrez. É uma grande surpresa que sejamos capazes de construir máquinas que joguem melhor xadrez do que quase qualquer pessoa da sala. Mas elas fazem-no testando muitas e muitas possibilidades. Se ela move para aqui, então posso mover para ali e ela para acolá, e por aí fora. Olham para cada uma das alternativas e escolhem a melhor. Os computadores examinam milhões de alternativas, mas um mestre de xadrez, um humano, fá-lo de modo diferente. Ele reconhece padrões. Estuda apenas trinta ou quarenta posições antes de decidir um movimento. Por isso, e embora as regras sejam mais simples no Go, as máquinas que o jogam não são muitos boas, já que para cada posição há demasiadas coisas para verificar e elas não conseguem fazê-lo em profundidade. Assim, o problema do reconhecimento de padrões e o que fazer nessas

circunstâncias é aquilo que os engenheiros (eles gostam de se intitularem cientistas da computação) ainda consideram muito difícil. É certamente uma das coisas importantes para os computadores do futuro, talvez mais importante do que as coisas de que falei. Fazer uma máquina que consiga jogar Go eficazmente!

P — Acho que nenhum método de computação será frutuoso se não conseguir fazer uma previsão de como compor tais aparelhos ou programas. Achei o artigo de Fredkin sobre lógica conservativa muito intrigante, mas assim que tentei pensar numa maneira de fazer um programa simples que utilizasse tais dispositivos caí num impasse porque só o pensar num programas destes é muito mais complexo do que o próprio programa. Penso que poderíamos facilmente cair numa espécie de regressão infinita, já que o processo de construção de um tal programa seria mais complexo do que o próprio programa e, ao tentarmos automatizar o processo, o processo de automação seria muito mais complexo, e por aí fora. Especialmente neste caso, em que o programa é integrado e separado, como o *software.* Acho que é fundamental pensar nos modos de composição.

R — Temos experiências diferentes. Não existe uma regressão infinita: há-de parar a um determinado nível de complexidade. A máquina de que Fredkin fala e aquela de que falei no caso da mecânica quântica são ambas computadores universais, no sentido em que podem ser programados para cumprir várias tarefas. Isto é, o programa não depende do equipamento. Não é diferente de qualquer computador vulgar em que se possa colocar informação — o programa é parte da informação de entrada — e que resolva o problema que lhe é posto. Estas coisas são muito incertas, mas encontrei um algoritmo. Se tiver um programa escrito para uma máquina irrever-

introduza um elemento de arrefecimento que represente muitos átomos, tenho de trabalhar de forma reversível. Na prática, provavelmente, nunca chegará a altura em que queiramos atar um pequeno computador a um grande pedaço de chumbo que contenha 10^{10} átomos (o que ainda é muito pequeno), tornando-o efectivamente irreversível. Portanto, concordo consigo em que, na prática, por muito tempo e talvez mesmo para sempre, utilizaremos portas irreversíveis. Por outro lado, faz parte da aventura da ciência tentar encontrar limitações em todas as direcções e levar a imaginação humana tão longe quanto possível. Embora em cada altura tenha parecido que uma tal actividade é absurda e inútil, muitas vezes vem a verificar-se que não é assim.

P — Existem algumas limitações ao princípio de incerteza? Existem algumas limitações fundamentais na energia e no tempo no seu esquema das máquinas reversíveis?

R — Esse era exactamente o meu argumento. Não existem mais limitações resultantes da mecânica quântica. É preciso distinguir muito bem entre a energia perdida ou consumida irreversivelmente, o calor gerado na operação da máquina e o conteúdo energético das partes em movimento, que poderá ser extraído novamente. Mas esta energia, que pode voltar a ser extraída, não tem importância nenhuma. Seria como perguntar se podemos adicionar a mc^2 a energia em repouso de todos os átomos que fazem parte do dispositivo. Falo apenas da energia perdida vezes o tempo e não há qualquer limitação. No entanto, é verdade que, se queremos fazer um cálculo a uma velocidade extremamente grande, é preciso dotar a máquina de partes que se movam rapidamente e tenham energia, mas essa energia não é necessariamente perdida em cada passo do cálculo, recupera-se com facilidade através da inércia.

R (a nenhuma *P*) — Posso apenas acrescentar, no que respeita ao capítulo das ideias inúteis, que tenho mais uma. Esperei que me perguntassem, mas não o fizeram, por isso vou responder de qualquer modo. Como é que faríamos uma máquina de dimensões tão pequenas em que tivéssemos de colocar os átomos em posições especiais? Hoje em dia não temos maquinaria com partes móveis cuja dimensão seja extremamente pequena, à escala de átomos ou mesmo centenas de átomos, mas também aí não há qualquer limitação física. Não há razão para que, quando dispomos o silício, mesmo hoje, as peças não possam ser feitas em pequenas ilhas, de modo que sejam movíveis. Também poderíamos arranjar pequenos jactos para injectar diferentes químicos em certos locais. Podemos construir maquinaria extremamente pequena. Esta maquinaria seria fácil de controlar pelo mesmo tipo de circuitos computacionais que construímos. Por fim, outra vez pelo gozo e prazer intelectual, podemos imaginar máquinas tão pequenas quanto uns poucos micrómetros, com rodas e cabos, todos interligados por fios, ligações de silício, de tal modo que a coisa como um todo (um grande dispositivo) se mova, não com os movimentos estranhos das máquinas rígidas do presente, mas com os modos suaves do pescoço de um cisne, que, afinal, é um conjunto de pequenas máquinas, as células, todas controladas de uma maneira suave. Por que não podemos fazer isso nós próprios?

3

O papel da cultura científica na sociedade moderna

Esta é uma conferência que Feynman deu no Simpósio Galileu, em Itália, em 1964. Com referências e tributos frequentes ao extraordinário trabalho e intenso sofrimento de Galileu, Feynman fala sobre o efeito da ciência na religião, no público e na filosofia, avisando que é a nossa capacidade de duvidar que determinará o futuro da civilização.

Eu sou o professor Feynman, apesar deste fato. Normalmente dou as conferências em mangas de camisa, mas, quando saí do hotel esta manhã, a minha mulher disse-me: «Devias usar um fato.» E eu disse-lhe: «Mas dou sempre as conferências em mangas de camisa.» E ela respondeu-me: «Sim, mas desta vez não sabes do que estás a falar; por isso devias tentar causar uma boa impressão...» E vesti o casaco.

mas que não têm muito a ver com a posição da ciência na sociedade e é um sonho pensar que decidir simplesmente sobre o modo como, idealmente, a ciência e a sociedade deviam ser reunidas é a solução para todos os problemas. Por isso, entendam, por favor, que, embora vá sugerir algumas modificações nesta relação, não espero que estas alterações sejam a solução dos problemas da sociedade.

A sociedade moderna parece estar atingida por uma série de ameaças graves e aquela em que gostava de me concentrar, que será de facto o tema central da minha discussão (embora haja uma série de pequenos temas subsidiários), é que acredito que um dos maiores perigos para a sociedade moderna é o ressurgimento e expansão de ideias de controlo do pensamento — como as que tiveram Hitler ou Estaline no seu tempo, a religião católica na Idade Média ou a China hoje em dia. Acho que um dos grande perigos é que isto aumente até englobar o mundo inteiro.

Agora, na discussão sobre a relação da ciência com a cultura científica, a primeira coisa que me vem à cabeça é a coisa mais óbvia, ou seja, a aplicação da ciência. As aplicações também são cultura. No entanto, não vou falar acerca das aplicações, embora por nenhuma razão em particular. Reparo que todas as discussões populares sobre a relação da ciência com a sociedade giram quase completamente em volta das aplicações. Mais, que as questões morais que os cientistas têm acerca daquilo que fazem envolvem normalmente as aplicações. Apesar disso, não

[11] Moderador da conferência.

vou falar acerca delas, já que há um número de outros assuntos que não são falados por tanta gente e, por divertimento, gostaria de falar de algo ligeiramente diferente.

Sobre as aplicações vou, no entanto, dizer que, como todos sabem, a ciência gera poder através do seu conhecimento, um poder para fazer coisas: somos capazes de fazer algo depois de o conhecermos cientificamente. Mas a ciência não dá instruções, juntamente com este poder, sobre o modo de fazer o bem e não o mal. Vamos colocar a situação de uma maneira simples: não há instruções juntamente com o poder e a questão de aplicar ou não a ciência é, essencialmente, o problema de organizar as aplicações de modo que não se cause demasiado mal e se consiga fazer o maior bem possível. Mas é claro que, por vezes, em ciência, as pessoas dizem que a responsabilidade não é delas, já que a aplicação é apenas o poder para fazer, independente do que se faz com ele. Mas, em certa medida, é com certeza verdade que é bom para a humanidade ter este poder de controlo, apesar das dificuldades sentidas para tentar descobrir o modo de controlar este poder para fazer o bem e não o mal.

Deixem-me dizer também que, embora muitos de nós aqui sejamos físicos e pensemos nos problemas sérios da sociedade em termos físicos, acredito convictamente que a próxima ciência a encontrar-se em dificuldades morais com as suas aplicações é a biologia. E, se os problemas da física parecem difíceis, os problemas do desenvolvimento do conhecimento biológico serão fantásticos. Estas possibilidades foram intuídas, por exemplo, no livro de Huxley *Admirável Mundo Novo,* mas podemos pensar numa variedade de coisas. Por exemplo, se no futuro longínquo a energia for fornecida simples e livremente pela física, então será uma mera questão química juntar os átomos necessários para produzir comida a partir da energia que os átomos tenham

conservado, pelo que se poderá produzir tanta comida quantos os desperdícios dos seres humanos — haverá uma conservação de material e acabará o problema da comida.

Haverá sérios problemas sociais quando descobrirmos o modo de controlarmos a hereditariedade e qual o tipo de controlo, bom ou mau, que devemos utilizar. Suponhamos que descobríamos a base fisiológica da felicidade ou de outros sentimentos, tal como a ambição, e suponhamos que podíamos controlar se alguém se sentia ou não ambicioso. E, finalmente, há a morte.

É uma das coisas mais extraordinárias que em todas as ciências biológicas não haja pistas para a necessidade da morte. Se disserem que queremos produzir um movimento perpétuo, já descobrimos leis suficientes, enquanto estudávamos física, para sabermos que tal é absolutamente impossível, ou então as leis estão erradas. Mas não há nada na biologia, encontrado até agora, que sustente a inevitabilidade da morte. Isto sugere-me que ela não é inevitável e que é apenas uma questão de tempo antes de os biólogos descobrirem o que nos causa o problema e de essa terrível doença universal, ou temporalidade do corpo humano, ser curada. Seja como for, podem ver que virão da biologia problemas de uma magnitude fantástica.

Agora vou falar de outra coisa.

Para além das aplicações, há ideias e estas são de dois tipos. Umas são o produto da própria ciência, ou seja, uma visão do mundo produzida pela ciência. Isto é, de certo modo, a parte mais bela da coisa. Algumas pessoas pensam que não, que os métodos da ciência é que são o importante. Bem, isso depende do facto de preferirmos os fins ou os meios, mas os meios produzem alguns fins maravilhosos e não quero maçá-los (bem, não os aborrecia se fizesse isto como deve ser) com os pormenores. Mas, como todos sabem alguma coisa acerca das maravilhas da ciência

— não estou a falar para uma audiência leiga —, não vou tentar entusiasmá-los outra vez com os factos do mundo: o sermos todos feitos de átomos, as enormes amplitudes de tempo e espaço que existem, a nossa posição histórica como resultado de uma série extraordinária de evolução ou mesmo a nossa posição na sequência evolutiva, além de o aspecto mais interessante da nossa visão científica do mundo ser a sua universalidade, e, embora falemos de nós como especialistas, a verdade é que não o somos.

Uma das hipóteses mais promissoras em biologia é que tudo o que os animais ou outras criaturas vivas façam pode ser entendido em termos do comportamento dos átomos, isto é, em termos de leis físicas. A atenção perpétua para com esta possibilidade — até agora nenhuma excepção foi demonstrada — tem gerado sugestões sobre o modo como a mecânica funciona de facto. Por isso, o facto de o nosso conhecimento ser universal é algo que não é completamente apreciado e a posição das teorias é tão completa que procuramos excepções e dificilmente as encontramos — pelo menos em física — e a grande justificação de todas estas máquinas é encontrarmos uma excepção àquilo que já é conhecido, que é o facto de o mundo ser tão maravilhoso, no sentido de as estrelas serem feitas dos mesmos átomos que as vacas e nós próprios e as pedras.

De vez em quando todos nós tentamos transmitir esta visão do mundo aos nossos amigos sem formação científica, mas na maioria das vezes atrapalhamo-nos na tentativa de lhes explicarmos as últimas novidades, tal como o significado da CP[12] (conservação da carga e paridade),

[12] Conservação da carga e paridade, uma das leis fundamentais de conservação da física, que diz que a carga eléctrica total e a paridade, uma propriedade de simetria intrínseca das partículas subatómicas, que entram numa interacção são as mesmas que saem dessa interacção.

já que eles não sabem nada acerca dos preliminares. Durante quatrocentos anos, depois de Galileu, temos andado a recolher informação sobre o mundo que eles desconhecem. Agora estamos a trabalhar em algo muito distante, nas fronteiras do conhecimento científico. E as coisas que aparecem nos jornais e parecem excitar a imaginação dos adultos são sempre aquelas que eles não podem compreender porque não aprenderam nada das coisas interessantes e conhecidas [para os cientistas] que foram descobertas antes. Não é este o caso com as crianças, felizmente, pelo menos até um dia se tornarem adultas.

Digo-lhes, e estou convencido de que todos o sabem por experiência, que as pessoas — quer dizer, as pessoas médias — são desgraçada, lamentável e absolutamente ignorantes sobre a ciência do mundo em que vivem e assim vão ficar. Não pretendo afastá-las, o que quero dizer é que elas conseguem permanecer assim sem se preocuparem muito — apenas ligeiramente —, pelo que de vez em quando, quando vêem a CP mencionada no jornal, perguntam do que se trata. E um aspecto interessante da relação da ciência com a sociedade moderna é o de saber como é que é possível as pessoas continuarem tão ignorantes, e ainda assim razoavelmente felizes na sociedade moderna, quando tanto do conhecimento não está disponível para elas?

Por acaso, e acerca do conhecimento e das maravilhas, o Sr. Bernardini disse que não devíamos ensinar maravilhas, mas sim conhecimento. Pode tratar-se de uma diferença no significado das palavras, mas acho que devíamos ensinar-lhes as maravilhas e que o propósito do conhecimento é apreciá-las ainda mais. E que o conhecimento serve apenas para dar a perspectiva correcta da maravilha que é a natureza. No entanto, ele, provavelmente, concor-

daria com que eu apenas baralhei as palavras e que o significado se escoa no meio da conversa. De qualquer modo, quero responder à questão do porquê de as pessoas permanecerem tão ignorantes e, ainda assim, não terem problemas na sociedade moderna. A resposta é que a ciência é irrelevante, e vou explicar o que quero dizer com isto já a seguir. Não é que tenha de ser assim, mas deixamos que seja irrelevante para a sociedade. Voltarei a este ponto.

Os outros aspectos da ciência que são importantes e que têm problemas na sua relação com a sociedade, para além das aplicações e dos factos que são descobertos, são as ideias e as técnicas da investigação científica, ou, se quiserem, os meios. Acho que é difícil de perceber por que é que a descoberta destes meios, que parecem tão evidentes e óbvios, não aconteceu antes. Ideias simples em que, uma vez testadas, se vê o resultado, e por aí fora. É, provavelmente, por a mente humana ter evoluído a partir da de um animal e se desenvolver de uma maneira que se assemelha a uma ferramenta nova que tem as suas doenças e dificuldades. Tem os seus problemas, um dos quais é ficar poluída pelas suas próprias superstições, confundindo-se, mas, finalmente, foi descoberta uma maneira de a manter na linha, de modo que os cientistas possam fazer um pequeno progresso numa certa direcção, em vez de andarem em círculos e acabarem por parar. E acredito que esta é, sem dúvida, a altura apropriada para discutir este assunto, já que os princípios desta nova descoberta aconteceram no tempo de Galileu. Estas ideias e técnicas são com certeza conhecidas de todos, pelo que apenas vou revê-las. É novamente uma daquelas coisas em que para uma audiência leiga é preciso entrar em pormenores. Aqui vou só mencioná-las para perceberem do que estou a falar especificamente.

A primeira coisa é o julgamento da evidência. Bem, a primeira coisa é mesmo que, antes de começarmos, não podemos saber a resposta. Assim, começamos sem certezas sobre qual é a resposta. Isto é muito, muito importante, tão importante que vou adiar este aspecto e voltar a ele mais tarde no meu discurso. A questão da dúvida e da incerteza é o que é necessário para começar, porque, se já soubermos a resposta, não precisamos de recolher quaisquer evidências acerca dela. Bem, uma vez incertos, a próxima coisa é procurar os dados e o método científico começa com tentativas. Mas outro caminho, muito importante, que não deve ser negligenciado e é vital, é arrumar ideias para tentar encorajar uma consistência lógica entre as várias coisas conhecidas. É muito importante tentar interligar isto e aquilo que se sabe e verificar se é consistente. E, quanto mais actividade no sentido de tentarmos coordenar as ideias provenientes de diferentes direcções, melhor.

Depois de procurarmos a evidência é preciso julgar a evidência. Existem as regras habituais acerca do juízo da evidência: não está certo escolher apenas o que se quer, mas sim utilizar todos os dados, tentar manter alguma objectividade — o suficiente para a manter a andar — e não acabar a depender da autoridade. A autoridade poderá ser uma pista para a verdade, mas não é a fonte da informação. Tanto quanto seja possível, devemos ignorar a autoridade sempre que as observações discordem dela. E, finalmente, o registo dos resultados deve ser feito de forma desinteressada. Esta é uma frase engraçada que me aborrece sempre porque parece que depois de um tipo fazer tudo não se deve ralar com os resultados, o que não é o caso. Desinteressado aqui significa que não devem ser relatados de modo a tentarem influenciar o leitor a favor de uma ideia diferente do que a evidência indica.

E todos os presentes apreciam estes aspectos.

Agora, tudo isto, todas estas ideias e todas as técnicas estavam no espírito de Galileu. O homem cujo aniversário estamos a celebrar teve muito a ver com o desenvolvimento, a expansão e, mais importante ainda, a demonstração do poder desta maneira de ver as coisas. Em cada centenário, ou quadricentenário, temos sempre a mesma sensação, mais cedo ou mais tarde: se o homem estivesse aqui e lhe mostrássemos o mundo, o que é que ele diria? É claro que todos dirão que é uma tolice dizer isto e que não se faz tal coisa num discurso, mas eis o que vou fazer: suponhamos que Galileu estava aqui e que lhe íamos mostrar o mundo de hoje e tentar fazê-lo feliz ou ver o que é que ele descobria. E explicávamos-lhe estes aspectos das evidências, estes métodos de julgamento que desenvolvemos e fazíamos-lhe notar que seguimos exactamente as mesmas tradições — até no pormenor de fazermos medições numéricas e de as utilizarmos como uma das melhores ferramentas, pelo menos em física. E mostrávamos-lhe que as ciências se têm desenvolvido continuamente numa óptima direcção a partir das suas ideias originais, no mesmo espírito que ele desenvolveu. E, como resultado, não há mais bruxas e fantasmas.

Actualmente, diria que o método quantitativo funciona muito bem em ciência e que, de facto, é quase uma definição da ciência de hoje. As ciências que preocuparam Galileu, a física, a mecânica e essas coisas, desenvolveram-se com certeza, mas as mesmas técnicas funcionam em biologia, história, geologia, antropologia, e por aí fora. Sabemos muitas coisas acerca da história passada do homem, da história dos animais e da Terra, tudo através de técnicas muito semelhantes. Com aproximadamente o mesmo sucesso, embora não tão completo devido às dificuldades, os mesmos sistemas funcionam em economia.

uma série de estudos sobre métodos de educação a serem feitos, particularmente no ensino da aritmética —, mas, se tentarem saber o que se sabe mesmo sobre o melhor método para ensinar aritmética, descobrirão que há um número enorme de estudos e uma série de estatísticas, mas que estão todos desconexos uns dos outros e são uma mistura de casos isolados e experiências não controladas, ou controladas de forma muito pobre, pelo que daí resulta muito pouca informação.

E, finalmente, como gostava de mostrar o nosso mundo a Galileu, tenho de lhe mostrar algo que me envergonha. Se olharmos à nossa volta, para além da ciência, encontramos uma coisa muito triste: o ambiente em que vivemos é activa e intensamente não científico. Galileu poderia dizer: «Reparei que Júpiter é uma esfera com luas e não um deus no céu. Diz-me: o que aconteceu aos astrólogos?» Bem, eles imprimem os seus resultados nos jornais, pelo menos nos Estados Unidos, em cada jornal diário, todos os dias. Por que é que ainda temos astrólogos? Por que é que alguém com um nome começado por «V» escreve um livro como *Mundos em Colisão?* É um nome russo? Hum? Vinikowski[13]? E como é que se tornou popular? Que disparate é esse acerca de Mary Brody, ou lá o que é? Não sei, estas coisas são malucas. Há uma quantidade infinita de coisas malucas que, postas de outra maneira, tornam o ambiente activa e intensamente não científico. Ainda há a conversa da telepatia, embora esteja a morrer.

---

[13] Na verdade é Immanuel Velikorsky.

Há também a cura pela fé por todo o lado. Há toda uma religião de cura pela fé. Há um milagre em Lourdes, onde ocorre a cura.

Agora pode ser verdade que a astrologia esteja correcta. Pode ser verdade que ir ao dentista no dia em que Marte faz um ângulo recto com Vénus seja melhor do que ir noutro dia. Pode ser verdade que possa ser curado pelo milagre de Lourdes. Mas, se é verdade, então tem de ser investigado. Porquê? Para o melhorar. Se é verdade, então talvez possamos descobrir se as estrelas influenciam a vida e tornar o sistema mais poderoso através da investigação, da estatística, com o julgamento científico e objectivo da evidência, cuidadosamente. Se o processo de cura funciona em Lourdes, a questão é quão longe do local do milagre deve situar-se a pessoa que está doente. Será que cometeram um erro e a fila de trás na verdade não funciona? Ou será que funciona tão bem que há muito espaço para mais pessoas serem acomodadas perto do local do milagre? Ou será possível, tal como acontece com os santos recentemente criados nos Estados Unidos — há um santo que cura a leucemia aparentemente de forma indirecta —, que as fitas que são pregadas no lenços do doente (estas fitas tocaram previamente em alguma relíquia do santo) aumentam a cura da leucemia, sendo a questão: estará o efeito a diluir-se gradualmente? Podem rir-se, mas, se acreditarem na veracidade da cura, então serão responsáveis pela sua investigação, por aumentarem a sua eficiência e a tornarem satisfatória, em vez de charlatã. Pode, por exemplo, acontecer que depois de 100 toques já não funcione mais. Agora é possível que os resultados da investigação tenham outras consequências, nomeadamente que não haja lá nada.

Outra coisa que me incomoda, mas que vale a pena ser mencioada, são as coisas que os teólogos dos tempos mo-

dernos discutem sem sentirem vergonha de si próprios. Há muitas coisas que eles podem discutir sem terem de se envergonharem, mas algumas das que aparecem nas conferências de religião e as decisões que necessitam de ser feitas são ridículas nos tempos que correm. Gostava de explicar que uma das dificuldades, uma das razões pelas quais isto pode continuar, é que não é apreciado o facto de que haveria uma profunda modificação da nossa visão do mundo se qualquer destas coisas realmente funcionasse. Se fosse possível saber a verdade sobre um pequeno item, não necessariamente de toda a astrologia, isso teria uma influência fantástica na nossa compreensão do mundo. E a razão pela qual nos rimos é porque confiamos tanto na nossa visão do mundo que estamos seguros de que essas outras não vão contribuir com nada. Por outro lado, por que é que não nos livramos disto? Voltarei ao assunto dentro de momentos porque a ciência é irrelevante [para a astrologia], tal como disse antes.

Agora vou mencionar outra coisa que é um pouco mais duvidosa, mas ainda assim acredito que no julgamento e relato da evidência há uma espécie de responsabilidade que os cientistas sentem em relação uns aos outros e que pode ser vista como um tipo de moralidade. Qual é a maneira certa ou a maneira errada de relatar os resultados? Desinteressadamente, de modo que o outro seja livre de compreender precisamente o que estamos a dizer e, na medida do possível, não o mascarando com os nossos próprios desejos. Isto é algo muito útil, que nos ajuda a compreendermo-nos uns aos outros e ao desenvolvimento, de um modo que não é pessoal, no nosso interesse, mas para um desenvolvimento geral das ideias, é algo muito valioso. E assim existe, se quisermos, uma espécie de moralidade científica. Acredito, sem dúvida, que deveríamos expandir esta moralidade, esta ideia, este tipo de mora-

lidade científica, e que coisas como a propaganda deviam passar a ser vistas como palavras sujas. Que a descrição de um país feita pela população de outro país seria desinteressada. Que milagre — isto seria melhor do que um milagre em Lourdes! Os anúncios, por exemplo, constituem uma descrição cientificamente imoral dos produtos. Esta imoralidade está tão espalhada que nos habituámos a ela na vida quotidiana e já não a vemos como uma coisa negativa. E penso que uma das razões importantes para aumentar o contacto dos cientistas com o resto da sociedade é explicar-lhe e acordá-la para este atraso permanente da clarividência da mente que resulta de não ter informação ou de a ter sempre de uma forma interesseira.

Existem outras coisas nas quais o método científico teria algum valor; são perfeitamente óbvias, mas tornam-se cada vez mais difíceis de discutir — coisas como tomar decisões. Não quero dizer que tenha de ser feito de modo científico à semelhança da Rand Company, que nos Estados Unidos se senta e faz cálculos aritméticos. Isso apenas me recorda os meus dias de estudante na universidade, em que descobrimos que, se usássemos a terminologia eléctrica para falar de mulheres — impedância, relutância, resistência —, tínhamos uma compreensão mais profunda da situação. Outra coisa que dá calafrios a um homem científico hoje em dia são os métodos de escolha dos líderes em qualquer nação. Por exemplo, nos Estados Unidos, os dois partidos políticos decidiram utilizar relações públicas, ou seja, homens da publicidade, que são treinados nos métodos necessários para dizerem a verdade ou mentirem de modo a desenvolverem um produto. Esta não era a ideia original. Era suposto discutirem situações e não apenas inventarem *slogans*. É verdade que, se procurarmos na história, a escolha de líderes políticos nos Estados Unidos foi, em várias ocasiões, baseada em *slogans* (tenho a cer-

teza de que cada partido tem agora contas bancárias milionárias e vão aparecer *slogans* muito bem pensados). Mas não posso fazer um apanhado de todas estas coisas agora.

Tenho estado sempre a dizer que a ciência é irrelevante. Isto soa estranho e gostaria de voltar ao assunto. É claro que é relevante, pelo facto de ser relevante para a astrologia, porque, se compreendemos o mundo tal como o fazemos, não podemos compreender como é que os fenómenos astrológicos acontecem. E isso é relevante. Mas para as pessoas que acreditam na astrologia não há qualquer relevância, porque o cientista nunca se incomoda a discutir com elas. As pessoas que acreditam na cura pela fé não têm de se preocupar com a ciência porque ninguém se incomoda a discutir com elas. Não precisamos de aprender ciência se não nos apetecer; por isso podemos esquecer o assunto se for um esforço mental muito grande, que geralmente é. E por que é possível esquecer o assunto? Porque não fazemos nada acerca disso. Acredito que devemos atacar estas coisas nas quais não acreditamos. Não é atacar pelo método de cortar cabeças, mas atacar no sentido de as discutir. Acredito que devemos exigir que as pessoas tentem, pela sua própria cabeça, obter uma visão mais consistente do seu próprio mundo. Que não se permitam o luxo de terem o cérebro cortado em quatro, ou mesmo duas partes, e num lado acreditarem numa coisa e no outro noutra, sem tentarem comparar os dois pontos de vista. Porque sabemos que, ao tentarmos juntar os dois pontos de vista que temos na cabeça e ao compará-los, conseguimos algum progresso na compreensão e apreciação daquilo que somos e onde estamos. Acredito que a ciência se tem mantido irrelevante porque esperamos até que alguém nos pergunte alguma coisa ou nos convide para fazermos um discurso sobre a teoria de Einstein para

pessoas que não compreendem a mecânica newtoniana, mas nunca somos convidados para fazermos um ataque à cura pela fé ou à astrologia (ou o que é a visão científica da astrologia hoje em dia).

Acho que temos de escrever uns artigos. E o que aconteceria? A pessoa que acredita em astrologia teria de aprender alguma astronomia. A pessoa que acredita na cura pela fé teria talvez de aprender alguma medicina e alguma biologia por causa da luta de argumentos. Por outras palavras, seria necessário que a ciência se tornasse relevante. O comentário, que li algures, de que a ciência está muito bem desde que não ataque a religião foi a pista de que precisava para compreender o problema. Enquanto não atacar a religião não é preciso prestar-lhe atenção e ninguém tem de aprender nada. Por isso pode ser cortada da sociedade moderna, com excepção das suas aplicações, e isolada. E depois temos esta luta terrível ao tentarmos explicar às pessoas coisas que elas não têm motivos para quererem saber. Mas, se quiserem defender o seu ponto de vista, terão de aprender qual é o nosso, nem que seja apenas um bocadinho. Por isso, sugiro, talvez incorrectamente, ou mesmo erradamente, que somos demasiado educados. No passado houve uma época em que se conversava sobre estes assuntos. Era sentido pela Igreja que as visões de Galileu a atacavam. Hoje a Igreja não sente que a visão científica a ataca. Ninguém se preocupa com isso. Ninguém ataca. Quer dizer, ninguém escreve tentando explicar as inconsistências entre as visões teológica e científica mantidas por diferentes pessoas hoje em dia — ou mesmo as inconsistências mantidas por um mesmo cientista entre as suas crenças religiosas e científicas.

O próximo assunto, o último de que quero falar, é aquele que considero mais importante e mais sério e tem a ver com a questão da dúvida e da incerteza. Um cientista nunca

está seguro. Todos sabem isso. Sabemos que todas as nossas afirmações são aproximadas, com diferentes graus de certeza. Quando é feita uma afirmação, a questão não é saber se é verdadeira ou não, mas antes quão provável é que seja verdadeira ou falsa. Deus existe? Quando posto na forma interrogativa, quão provável é que exista? Isto causa uma tal transformação do ponto de vista religioso que é por isso que este é tão pouco científico. Devemos discutir cada questão com a incerteza que lhe é permitida. E, à medida que aumenta a evidência, aumenta ou diminui a probabilidade de uma ideia estar certa. Mas nunca faz com que qualquer das possibilidades esteja certa. Descobrimos que isto tem uma importância fundamental para progredirmos. Temos mesmo de deixar espaço para a dúvida ou não haverá progresso nem aprendizagem. Não há aprendizagem sem a necessidade de questionar. E uma questão requer a dúvida. As pessoas procuram a certeza, mas *não há* qualquer certeza. As pessoas ficam aterrorizadas: como é possível viver e *não* saber? Não é nada estranho. Na verdade, apenas pensamos que sabemos e a maioria das nossas acções baseia-se em conhecimento incompleto, mas realmente não sabemos do que se trata ou qual é o propósito do mundo ou de muitas outras coisas. É possível viver e não conhecer.

Então a liberdade para duvidar, que é absolutamente essencial para o desenvolvimento das ciências, nasceu de uma luta com as autoridades da época, nomeadamente a Igreja, que tinham uma solução para cada problema. Galileu é um símbolo dessa luta — um dos mais importantes lutadores. E, embora o próprio Galileu tenha sido, aparentemente, obrigado a retroceder, ninguém leva a confissão a sério. Não sentimos que devemos seguir Galileu no seu caminho e que devemos todos retroceder. Na verdade, consideramos esta reconsideração uma tolice — a Igreja

quis essa tolice, que vemos uma e outra vez. E sentimos simpatia por Galileu, tal como sentimos simpatia pelos músicos e artistas da União Soviética que tiveram de retroceder várias vezes nos tempos recentes. Mas o retrocesso é uma coisa sem sentido, não interessa quão bem é organizado. É perfeitamente óbvio para quem está de fora que não há nada a reconsiderar e que a reconsideração de Galileu não é nada que devamos discutir como demonstração de alguma coisa acerca dele, excepto talvez que era um homem idoso e que a Igreja era muito poderosa. O facto de que Galileu tinha razão não é essencial para esta discussão. O facto de terem sido feitas várias tentativas para tentarem suprimi-lo certamente que o é.

Todos nós nos entristecemos quando olhamos para o mundo e vemos as poucas conquistas que fizemos, comparadas com aquelas que achamos serem as potencialidades dos seres humanos. As pessoas no passado, no pesadelo dos seus tempos, tinham sonhos para o futuro. E agora, que o futuro se materializou, vemos que, de muitas maneiras, os sonhos foram ultrapassados, mas em muitas mais os nossos sonhos de hoje são os mesmos das pessoas do passado. Houve, no passado, grande entusiasmo sobre um ou outro método para resolver um problema. Um foi o de que a educação devia tornar-se universal, originando que todos os homens se tornassem Voltaires, e então teríamos tudo endireitado. A educação universal é, provavelmente, uma coisa boa, mas podíamos ensinar tanto o bem como o mal, ensinar tanto falsidades como verdades.

A comunicação entre as nações, tal como é promovida através do desenvolvimento técnico da ciência, deverá certamente melhorar as relações entre elas. Bem, depende do que se comunica. Podem comunicar-se verdades ou mentiras. Podem comunicar-se ameaças ou amabilidades. Havia uma grande esperança em que as ciências aplicadas liber-

tassem o homem das suas dificuldades físicas, e particularmente em medicina parece que tudo é feito para o bem. Sim, mas enquanto falamos há cientistas a trabalhar em laboratórios secretos, tentando desenvolver, o melhor que sabem, doenças que os outros homens não sabem curar.

Talvez hoje tenhamos o sonho de que a satisfação económica de todos os homens seja a solução para o problema. Quero dizer que toda a gente devia ter o suficiente. Não quero dizer, é claro, que não estejamos a tentar fazer isso. Não pretendo dizer, com estas minhas palavras, que não devamos educar, comunicar ou produzir a satisfação económica. Mas que isto seja, por si próprio, a solução para todos os problemas é duvidoso. Porque naqueles lugares onde há um certo grau de satisfação económica há toda uma estirpe de novos problemas ou, provavelmente, de velhos problemas que apenas parecem um pouco diferentes porque já conhecemos o suficiente da história.

Por isso hoje não estamos assim muito bem, não vemos o que é que fizemos bem feito. Homens, filósofos de todas as épocas, tentaram encontrar o segredo da existência, o significado de tudo. Porque, se conseguissem descobrir o verdadeiro significado da vida, então todo este esforço humano, toda esta maravilhosa potencialidade dos seres humanos, poderiam ser orientados na direcção correcta e marcharíamos em frente com grande sucesso. E assim tentámos as diferentes ideias. Mas a questão sobre o significado do mundo, ou da vida, ou dos seres humanos, e por aí fora, já foi respondida muitas vezes por muitas pessoas diferentes. Infelizmente, todas as respostas são diferentes e as pessoas com uma resposta olham com horror para as acções e comportamentos das pessoas com outra resposta. Horror porque vêem as coisas terríveis que são feitas, o modo como o homem está a ser empurrado para uma alameda cega por esta visão rígida do signifi-

cado do mundo. De facto, talvez seja pelo tamanho fantástico do horror que se tornam claras as potencialidades dos seres humanos e seja possível ter esperança em que, se movermos as coisas na direcção certa, tudo será muito melhor.

Qual é então o significado do mundo inteiro? Não sabemos qual é o significado da existência. Como resultado de estudarmos todas as visões que tivemos antes descobrimos que não sabemos qual é o significado da existência, mas ao fazê-lo encontrámos, provavelmente, um canal aberto. Se permitirmos que tal aconteça, à medida que progredimos deixamos abertas oportunidades para alternativas e não nos tornamos entusiastas do facto, do conhecimento, da verdade absoluta, mas mantemo-nos sem certezas — em risco. Os ingleses, que desenvolveram o seu governo nesta direcção, chamam-lhe o *muddling through*[14] e, embora soe uma coisa parva e estúpida, é o modo mais científico de progredir. Decidir a resposta não é científico. Para fazermos progressos temos de deixar a porta entreaberta para o desconhecido — apenas entreaberta. Estamos apenas nos primórdios do desenvolvimento da raça humana, da mente humana, da vida inteligente, temos anos e anos no futuro. É nossa responsabilidade não darmos hoje a resposta para tudo, levarmos toda a gente nessa direcção e dizermos: «Esta é a solução para todas as coisas.» Porque então ficaríamos acorrentados aos limites da nossa imaginação presente. Seremos apenas capazes de fazer aquelas coisas que hoje pensamos que são possíveis, enquanto, se deixarmos espaço para a dúvida, para a discussão, e procedermos de um modo análogo às ciências, então esta dificuldade não aparecerá. Acredito, portanto, que,

---

[14] Significa ser bem sucedido apesar da falta de planeamento ou de método. *(N. da T.)*

embora não seja o caso hoje, poderá chegar o dia, espero, em que será aceite que o poder do governo deve ser limitado, que os governos não devem ser empossados para decidirem a validade das teorias científicas, que esta é uma coisa ridícula. Que não são eles que decidem as várias descrições da história, da teoria económica ou da filosofia. Apenas deste modo podem as possibilidades reais do futuro da raça humana ser completamente desenvolvidas.

4

Há muito espaço lá no fundo

Nesta famosa conferência para a Sociedade Americana de Física em 29 de Dezembro de 1959 em Caltech, «Pai da nanotecnologia», Feynman discursa, décadas à frente do seu tempo, sobre o futuro da miniaturização: como pôr toda a Enciclopédia Britânica *na cabeça de um alfinete, a redução drástica no tamanho de objectos biológicos e inanimados e os problemas de lubrificação das máquinas mais pequenas do que o ponto final desta frase. Feynman faz uma aposta famosa, desafiando os jovens cientistas a construírem um motor que funcione e seja mais pequeno do que 1/64 de uma polegada (0,397 milímetros) em qualquer dos lados.*

Um convite para entrar num novo campo da física

Imagino que os físicos experimentais olhem frequentemente com inveja para homens como Kamerlingh Onnes[15], que descobriu um campo, como o das baixas temperaturas, que parece não ter fim e no qual podemos ir sempre mais fundo. Este homem é um líder e teve durante algum tempo o monopólio de uma aventura científica. Percy Bridgman[16], ao desenhar uma maneira de obter altas pressões, abriu outro campo novo e pôde entrar nele, levando-nos consigo. O desenvolvimento de um vácuo ainda maior foi um trabalho do mesmo género. Gostaria de descrever um campo em que pouco foi ainda feito, mas no qual, em princípio, muito pode ser alcançado. Este campo não é bem como os outros, porque não nos dirá muito sobre a física fundamental (como seja «o que são as partículas estranhas?»), mas é antes como a física do estado sólido, no sentido em que poderá dizer-nos muito e de grande interesse acerca dos estranhos fenómenos que ocorrem nas situações complexas. Mais, um aspecto muito importante é que teria um número enorme de aplicações tecnológicas.

Aquilo de que quero falar é sobre o problema da manipulação e controlo de coisas em pequena escala. Mal digo isto, as pessoas falam-me logo da miniaturização e até onde já progrediu hoje em dia. Falam-me sobre motores eléctricos do tamanho de uma unha do dedo mindinho.

---

[15] Prémio Nobel da Física de 1913 pela investigação das propriedades da matéria a baixa temperatura, que levou à produção do hélio líquido.

[16] Prémio Nobel da Física de 1946 pela sua invenção de um aparelho para produção de pressões extremamente altas e pelo trabalho seguinte na física das altas pressões.

mundo espantosamente pequeno abaixo desse. No ano de 2000, quando olharem para trás, para hoje, vão questionar-se por que é que só em 1960 é que alguém começou a mover-se seriamente nesta direcção.

Por que é que não podemos imprimir todos os 24 volumes da Enciclopédia Britânica *na cabeça de um alfinete?*

Vejamos o que é que isto envolveria. A cabeça de um alfinete tem 1/16 de polegada (0,159 milímetros) de diâmetro. Se a ampliarmos 25 000 vezes, a área da cabeça de um alfinete será igual à área ocupada por todas as páginas da *Enciclopédia Britânica.* Assim, apenas necessitamos de reduzir 25 000 vezes o tamanho da letra da enciclopédia. Será isto possível? O poder de resolução do olho é de cerca de 1/120 de polegada (0,21 milímetros) — o que é aproximadamente o diâmetro de cada um dos pequenos pontos das reproduções a meio tom da enciclopédia. Este, quando se reduz 25 000 vezes, ainda tem 80 angstroms[17] de diâmetro, ou seja, 32 átomos de um metal normal. Por outras palavras, um destes pontos ainda conteria, na sua área, mil átomos. Assim, cada ponto pode ser facilmente reajustado em tamanho de acordo com as necessidades da fotogravação e não há dúvidas sobre o espaço existente na cabeça de um alfinete para lá colocar a *Enciclopédia Britânica.*

Além disso, se for escrito, também poderá ser lido. Vamos imaginar que é escrito em letras salientes de metal,

---

[17] Um angstrom = 10^{-10} do metro.

isto é, onde está o preto na enciclopédia levantámos letras de metal que têm, de facto, 1/25 000 do seu tamanho original. Como é que o líamos?

Se tivéssemos alguma coisa escrita deste modo, poderíamos lê-la utilizando técnicas de uso comum hoje em dia (sem dúvida que se encontraria uma maneira melhor quando se tivesse escrito, mas para defender a minha posição de modo conservador vou apenas utilizar técnicas que sejam conhecidas hoje). Pressionaríamos o metal sobre um material plástico e faríamos um molde; depois retiraríamos o filme de plástico cuidadosamente e evaporaríamos sílica no plástico para fazermos um filme muito fino; então faríamos uma sombra evaporando ouro a um determinado ângulo da sílica de modo que todas as pequenas letras aparecessem claramente; dissolvíamos o plástico do filme de sílica e observaríamos com um microscópio electrónico!

Não há dúvidas de que, se a coisa fosse reduzida 25 000 vezes sob a forma de letras salientes num alfinete, ser-nos-ia fácil lê-la. Mais, não há dúvidas de que seria fácil fazer cópias da matriz; necessitaríamos apenas de pressionar a mesma placa de metal sobre o plástico para termos uma nova cópia.

Como é que escrevemos pequeno?

A próxima questão é: como é que o escrevemos? Não temos hoje nenhuma técnica normalizada para o fazermos. Mas deixem-me argumentar que não é tão difícil como parece à primeira vista. Podemos reverter as lentes do microscópio electrónico para reduzir, tal como fazemos para aumentar. Uma fonte de iões, enviados através destas lentes de microscópio revertidas, pode ser focada

num ponto muito pequeno. Poderíamos escrever com esse ponto, tal como escrevemos num osciloscópio de raios catódicos de TV, em linhas atravessadas e com um ajustamento que determinasse a quantidade de material que vai ser depositado à medida que fazemos o varrimento em linhas.

Este método pode ser muito lento devido às limitações da carga espacial. Haverá métodos mais rápidos. Podíamos começar, talvez com uma descarga fotográfica, um arco atrás dos buracos e desenhar iões metálicos através destes; depois podíamos utilizar novamente o nosso sistema de lentes e fazer uma pequena imagem sob a forma de iões, que depositariam o metal no alfinete.

Uma maneira mais simples pode ser a seguinte (embora não tenha a certeza de que funcione): utilizamos luz e, através do microscópio óptico a funcionar ao contrário, focamo-la num ecrã fotoeléctrico muito pequeno. Então os electrões que saem do ecrã onde a luz incide são focados pelas lentes do microscópio electrónico directamente na superfície do metal. Irá este feixe gravar no metal, desde que funcione o tempo suficiente? Não sei. Se não funcionar para uma superfície metálica, deverá ser possível encontrar outra superfície para forrar o alfinete original, de modo que onde os electrões forem bombardeados seja feita uma alteração que mais tarde podemos reorganizar.

Nestes dispositivos não há problemas de intensidade, ao contrário do que acontece nas ampliações em que poucos electrões são espalhados num grande ecrã; é exactamente o contrário. A luz que obtemos de uma página é concentrada numa área muito pequena, pelo que é muito intensa. Não sei por que é que isto ainda não foi feito!

Isto é a *Enciclopédia Britânica* numa cabeça de alfinete, mas vamos considerar todos os livros do mundo. A Biblioteca do Congresso tem aproximadamente 9 milhões de

volumes; a Biblioteca do Museu Britânico tem 5 milhões; existem também 5 milhões de volumes na Biblioteca Nacional em França. Sem dúvida que há duplicações; por isso digamos que existem cerca de 24 milhões de volumes com interesse no mundo.

O que aconteceria se imprimíssemos tudo isto na escala que temos estado a discutir? Que espaço seria necessário? Ocuparia, é claro, a área de um milhão de cabeças de alfinete porque, em vez de apenas 24 volumes da enciclopédia, há 24 milhões de volumes. Poderíamos dispor um milhão de alfinetes num quadrado com mil alfinetes de lado ou numa área de 3 jardas quadradas (2,5 metros quadrados). Isto é, a réplica de sílica com a cobertura fina de plástico, com a qual fizemos as cópias, contendo toda esta informação, ocuparia uma área equivalente a, aproximadamente, 35 páginas da enciclopédia. Isso é metade das páginas desta revista. Toda a informação que a humanidade registou em livro pode ser transportada num panfleto na nossa mão — e não escrita em código, mas antes uma simples reprodução das imagens originais, gravuras e tudo o mais numa escala pequena e sem qualquer perda de resolução.

O que diria o nosso bibliotecário de Caltech, enquanto corre de um edifício para o outro, se lhe dissesse que, daqui a dez anos, toda a informação que ele luta por manter ordenada — 120 000 volumes, empilhados do chão até ao tecto, gavetas cheias de cartões, armazéns cheios com os livros velhos — pode ser mantida em apenas um cartão de biblioteca! Quando a Universidade do Brasil, por exemplo, descobrir que a sua biblioteca está queimada, podemos enviar-lhe uma cópia de cada um dos livros da nossa biblioteca, fazendo uma cópia da placa mestra em poucas horas e enviando-a por correio num envelope que não é maior nem mais pesado do que qualquer carta normal.

Bem, o título desta conferência é «Há *muito* espaço lá no fundo», e não apenas «Há espaço lá no fundo». O que demonstrei é que há espaço, que é possível diminuir o tamanho das coisas de uma maneira prática. Agora quero mostrar que há *muito* espaço. Não vou discutir como é que vamos fazê-lo, mas apenas o que é possível fazer, em princípio — por outras palavras, o que é possível de acordo com as leis da física. Não estou a inventar a antigravidade, que apenas será possível se as leis não forem o que pensamos. Digo-lhes o que pode ser feito se as leis *forem* o que pensamos; não estamos já a fazê-lo simplesmente porque ainda não nos dispusemos a isso.

Informação numa escala pequena

Suponhamos que, em vez de tentarmos reproduzir as imagens e toda a informação directamente, na sua forma presente, escrevemos apenas o conteúdo num código de pontos e traços, ou qualquer coisa semelhante, que represente as várias letras. Cada letra representa seis ou sete *bits* de informação, isto é, precisamos apenas de seis ou sete pontos e traços para cada letra. Agora, em vez de escrever tudo, como fiz antes, na superfície de um alfinete, vou também utilizar o interior do material.

Vamos representar um ponto por um pequeno sinal de um metal, o traço seguinte por um sinal adjacente de outro metal, e por aí fora. Suponhamos, sendo conservadores, que um *bit* de informação precisa de um pequeno cubo de 5 por 5 átomos, isto é, 125 átomos. Talvez necessitemos de uma centena e de mais alguns átomos estranhos para termos a certeza de que a informação não se perde por difusão ou outro processo.

Calculei quantas letras existem na enciclopédia, assumindo que cada um dos 24 milhões de livros tem o tamanho de um volume da enciclopédia, e então calculei quantos *bits* de informação há. Para cada *bit* atribuí 100 átomos. E verifica-se que toda a informação que o homem acumulou cuidadosamente em todos os livros do mundo pode ser escrita desta forma num cubo de material com 1/200 de polegada (0,127 milímetros) de lado — o que é a mais pequena partícula de pó que pode ser vista pelo olho humano. Por isso há *muito* espaço lá no fundo! Não me falem do microfilme!

Este facto — as quantidades enormes de informação que podem ser transportadas num espaço extraordinariamente pequeno — é, obviamente, bem conhecido dos biólogos e resolve o mistério, que existia antes de compreendermos isto claramente, do modo como na mais pequena célula pode ser armazenada toda a informação necessária para a organização de uma criatura tão complexa como nós próprios.

Toda esta informação — se temos olhos castanhos, ou se pensamos, ou se no embrião o osso se deve desenvolver com um pequeno orifício lateral para que mais tarde possa aí crescer um nervo —, toda esta informação está contida numa fracção muito pequena da célula, sob a forma de longas cadeias de ADN, em que aproximadamente 50 átomos são utilizados para um *bit* de informação sobre a célula.

Melhores microscópios electrónicos

Se escrevi num código, com 5 por 5 átomos para cada *bit,* a questão é: como é que posso ler isto hoje em dia? O microscópio electrónico ainda não é suficientemente

cem vezes. Não é impossível, não é contra as leis da difracção do electrão. O comprimento de onda do electrão num microscópio destes é apenas 1/20 do angstrom. Pelo que devia ser possível ver os átomos individuais. Quão bom seria ver os átomos individuais distintamente?

Temos amigos noutros campos, na biologia, por exemplo. Nós, os físicos, muitas vezes olhamos para eles e dizemos: «Sabem por que é que estão a fazer tão poucos progressos?» (Na verdade, hoje em dia não conheço outra área em que estejam a ser feitos progressos mais rápidos do que em biologia.) «Deviam utilizar mais matemática, como nós fazemos.» Eles podiam responder-nos, mas, como são educados, vou responder por eles: «O que os físicos deviam fazer para *nós* fazermos progressos mais rápidos era tornarem o microscópio electrónico cem vezes melhor.»

Quais são os problemas centrais e mais fundamentais da biologia de hoje? São questões como: qual é a sequência de bases no ADN? O que acontece quando há uma mutação? Como é que a ordem das bases no ADN está ligada à ordem dos aminoácidos na proteína? Qual é a estrutura do ARN? É de cadeia simples ou dupla e como é que está relacionada com a ordem das bases no ADN? Qual é a organização dos microssomas? Como é que são sintetizadas as proteínas? Para onde vai o ARN? Como é que se localiza? Onde é que ficam as proteínas? Para onde vão os aminoácidos? Na fotossíntese, onde está a clorofila, como é que está disposta, onde é que estão os carotenóides envolvidos nisso? Qual é o sistema de conversão da luz em energia química?

É muito fácil responder a muitas destas perguntas biológicas fundamentais: é preciso apenas olhar para a coisa! Veremos a ordem das bases na cadeia, veremos a estrutura do microssoma. Infelizmente, o microscópio actual vê a uma escala que ainda é muito grosseira. Se fizerem o microscópio cem vezes mais poderoso, muitos dos problemas da biologia tornar-se-ão mais fáceis. É claro que estou a exagerar, mas os biólogos certamente ficariam muito agradecidos e prefeririam isso às críticas sobre o facto de deverem utilizar mais matemática.

A teoria de processos químicos de hoje é baseada na física teórica. Neste sentido, a física fornece a fundação da química. Mas a química também tem a análise. Se tivermos uma substância estranha e quisermos saber o que é, termos de percorrer um processo longo e complicado de análise química. Hoje pode analisar-se quase tudo; por isso estou um pouco atrasado na minha ideia, mas, se os físicos quisessem, também podiam trabalhar, sob a orientação dos químicos, no problema da análise química.

Seria muito simples fazer uma análise de qualquer substância química complicada. Apenas teríamos de olhar para ela e de ver onde é que estão os átomos. O único problema é que o microscópio electrónico é cem vezes mais pobre do que o necessário. (Mais tarde gostaria de perguntar: podem os físicos fazer alguma coisa pelo terceiro problema da química, nomeadamente a síntese? Há alguma maneira *física* de sintetizar uma substância química qualquer?)

A razão por que o microscópio electrónico é tão pobre é que o valor *f* das lentes é apenas de uma parte para mil. Não há uma abertura numérica suficientemente grande. E sei que há teoremas que provam que é impossível, com lentes de campo estacionário e simetria axial, produzir um valor *f* maior do que tal e tal. Logo, o poder de resolução do momento está no seu máximo teórico. Mas em qual-

quer teorema há suposições. Por que é que o campo tem de ser simétrico? Coloco este desafio: não há meio de tornar o microscópio electrónico mais poderoso?

O maravilhoso sistema biológico

O exemplo biológico de escrever informação em pequena escala inspirou-me para pensar em algo que deveria ser possível. A biologia não é simplesmente escrever informação, é fazer alguma coisa acerca disso. Um sistema biológico pode ser extraordinariamente pequeno. Muitas das células são muito pequenas, mas muito activas; produzem muitas substâncias; movem-se de um lado para o outro; oscilam e fazem todo o tipo de coisas maravilhosas — tudo numa escala pequena. Também armazenam informação. Consideremos a possibilidade de também nós podermos construir uma coisa muito pequena que fará o que quisermos — de podermos construir um objecto que se manobre a esse nível!

Poderá até haver um interesse económico neste negócio de fazer as coisas muito pequenas. Deixem-me lembrar-lhes alguns dos problemas das máquinas de computação. Nos computadores temos de armazenar uma quantidade enorme de informação. O tipo de escrita que mencionei antes, em que tinha tudo expresso como uma distribuição de metal, é permanente. Muito mais interessante para um computador é um método de escrita, remoção e reescrita de outra coisa diferente. Isto acontece geralmente porque não queremos gastar o material onde acabámos de escrever. No entanto, se pudéssemos escrever num espaço muito pequeno, já não faria diferença e podia simplesmente ser deitado fora depois de lido. O material não custa muito.

A miniaturização do computador

Não sei como fazer isto numa escala pequena de uma maneira prática, mas sei que os computadores são muito grandes, enchem salas. Por que não podemos fazê-los pequenos, construí-los com pequenos fios, pequenos elementos — e por pequeno quero dizer *pequeno*. Por exemplo, os fios deviam ter 10 a 100 átomos de diâmetro e os circuitos alguns milhares de angstroms de comprimento. Toda a gente que já analisou a teoria lógica dos computadores chegou à conclusão de que as possibilidades dos computadores seriam muito interessantes se fosse possível fazê-los várias ordens de magnitude mais complicados. Se tivessem milhões de vezes mais elementos, poderiam fazer julgamentos. Teriam tempo para calcular qual é o melhor caminho para fazer o cálculo que estão prestes a iniciar. Poderiam seleccionar o método de análise que, a partir da sua experiência, é melhor do que aquele que lhes damos. E, de muitas outras maneiras, teriam novas características qualitativas.

Se olhar para a cara de alguém, reconheço imediatamente se já o vi antes (na verdade, os meus amigos dirão que escolhi um exemplo infeliz; pelo menos reconheço que é um homem e não uma maçã). No entanto, não há uma máquina que, com essa velocidade, possa fazer uma imagem de uma cara e dizer que se trata de um homem — e muito menos que é o homem que lhe foi mostrado antes, a menos que seja exactamente a mesma fotografia. Se a face está alterada, se estou mais perto, se estou mais longe, se a luz muda, reconheço-o de qualquer modo. Este pequeno computador que trago na cabeça é capaz de fazer isso facilmente. O número de elementos nesta caixa de ossos é enormemente superior ao número de elementos dos nossos «maravilhosos» computadores. Mas os nossos com-

putadores mecânicos são muito grandes; os elementos desta caixa são microscópicos. Quero fazer uns que sejam submicroscópicos.

Se quiséssemos fazer um computador que tivesse todas estas maravilhosas qualidades extra, possivelmente tínhamos de construí-lo do tamanho do Pentágono. Isto tem várias desvantagens. Primeiro, requer demasiado material; poderá não existir germânio suficiente no mundo para todos os transístores que teriam de ser postos nesta coisa enorme. Há também o problema da produção de calor e do consumo de energia; seria necessário TVA para o computador funcionar. Mas uma dificuldade ainda mais prática é que o computador estaria limitado a uma determinada velocidade. Devido ao seu tamanho enorme, há um tempo finito para levar a informação de um lado para o outro. A informação não pode seguir mais depressa do que a velocidade da luz — por isso, em última análise, quando os nossos computadores se tornam mais rápidos e mais elaborados, temos de os fazer cada vez mais pequenos.

Mas existem grandes possibilidades de os tornarmos mais pequenos. Não há nada que vejamos nas leis físicas que nos diga que os elementos do computador não podem ser muitíssimo mais pequenos do que são agora. Na verdade, talvez haja algumas vantagens.

A miniaturização por evaporação

Como é que podemos construir um dispositivo destes? Que tipo de processos de manufactura usaríamos? Uma possibilidade que podemos considerar, já que falámos da escrita feita por disposição de átomos num certo arranjo, seria evaporar o material e depois evaporar o isolador que está ao lado. Então, para a próxima camada, evaporamos

Mas gostaria de discutir, só por divertimento, outras possibilidades. Por que não podemos construir estes pequenos computadores do mesmo modo que construímos os grandes? Por que não podemos fazer furos, cortar coisas, soldá-las, imprimir e moldar diferentes formas a um nível infinitesimal? Quais são as limitações a quão pequena uma coisa tem de ser para que já não seja possível moldá-la? Quantas vezes, quando estamos a trabalhar em algo frustrantemente pequeno, como o relógio de pulso da nossa mulher, dissemos para nós próprios: «Se pelo menos conseguisse treinar uma formiga para fazer isto!» Aquilo que gostava de sugerir é a possibilidade de treinar uma formiga para treinar um ácaro, para fazer isto. Quais são as possibilidades de máquinas pequenas, mas móveis? Poderão ou não ser úteis, mas certamente seria divertido fazê-las.

Consideremos outra máquina, por exemplo, um automóvel, e perguntemos quais são os problemas de construirmos uma máquina infinitesimal como essa. Suponhamos, no desenho particular do automóvel, que precisamos de uma certa precisão das partes; necessitamos de uma precisão de, vamos supor, 4/10 000 polegadas (aproximadamente 10 micrómetros). Se as coisas forem mais grosseiras do que isto, na forma do cilindro ou assim, não vai funcionar muito bem. Se faço a coisa muito pequena, tenho de me preocupar com o tamanho dos átomos; não consigo fazer um círculo de esferas, por assim dizer, se o círculo for muito pequeno. Assim, se cometer o erro correspondente a 4/10 000 polegadas, que corresponde a um erro de 10 átomos, posso reduzir as dimensões de um automóvel 4000 vezes, aproximadamente — ou seja, para um milíme-

tro. De um lado ao outro. Obviamente, se desenhar o carro para que funcione com um grau de tolerância muito maior, o que não é impossível, então posso fazer um dispositivo muito mais pequeno.

É interessante considerar quais são os problemas destas máquinas muito pequenas. Em primeiro lugar, com as partes esforçadas ao mesmo nível, as forças variam com a área que estamos a reduzir, pelo que coisas como o peso ou a inércia têm relativamente pouca importância. Por outras palavras, a resistência do material é, em proporção, muito maior. O *stress* e as expansões do volante do motor pela força centrífuga, por exemplo, só serão da mesma ordem se a velocidade de rotação for aumentada na mesma proporção em que diminuímos o tamanho. Por outro lado, os metais que utilizamos têm um certo grão, o que seria muito aborrecido em pequena escala, já que o material não é homogéneo. Os plásticos, o vidro e coisas com esta natureza amorfa são muito mais homogéneos, pelo que teríamos de construir as nossas máquinas com estes materiais.

Existem problemas associados à parte eléctrica do sistema — com os fios de cobre e as partes magnéticas. As propriedades magnéticas numa escala pequena não são as mesmas que numa escala grande; existe o problema do «domínio». Um grande magneto, constituído por milhões de domínios, só pode ser feito em pequena escala com um domínio. O equipamento eléctrico não pode ser simplesmente reduzido, terá de ser redesenhado. Mas não vejo razão para que não possa ser redesenhado e funcionar novamente.

Problemas de lubrificação

A lubrificação envolve alguns aspectos interessantes. A viscosidade efectiva do óleo seria cada vez maior à me-

dida que fôssemos reduzindo o tamanho (e se aumentássemos a velocidade o mais possível). Se não aumentarmos tanto a velocidade e mudarmos de óleo para querosene ou outro fluido, o problema não será tão grave. Mas talvez não tenhamos mesmo de lubrificar! Temos muita força extra. Deixemos secar as partes; não aquecerão porque o calor escapa-se muito rapidamente de um dispositivo tão pequeno. Esta rápida perda de calor impedirá a gasolina de explodir, pelo que não é possível ter um motor de combustão interno. Podem ser utilizadas outras reacções químicas que libertem energia a frio. Provavelmente, um fornecimento externo de energia eléctrica seria o mais conveniente para uma máquina tão pequena.

Qual seria a utilidade de uma máquina destas? Quem sabe? É claro que um automóvel pequeno apenas serviria para os piolhos guiarem e suponho que os nossos interesses cristãos não vão tão longe. No entanto, vimos a possibilidade de manufacturar pequenos elementos para computadores em fábricas completamente automáticas, contendo tornos e outras ferramentas a um nível muito pequeno. Um pequeno torno não seria exactamente igual a um grande. Deixo à imaginação de todos o melhoramento do *design* de modo a tirar vantagem das propriedades em pequena escala, de tal modo que a automatização seja fácil de gerir.

Um amigo meu (Albert R. Higgs) sugere uma possibilidade muito interessante para máquinas relativamente pequenas. Ele diz que, embora seja uma ideia louca, seria interessante se, em cirurgia, fosse possível engolir o cirurgião. Colocamos o cirurgião mecânico dentro do vaso sanguíneo, vai até ao coração e dá uma vista de olhos (é claro que a informação tem de ser transmitida). Descobre qual é a válvula que está defeituosa, leva uma pequena faca e corta-a. Outras pequenas máquinas poderiam ser

incorporadas no corpo para assistirem órgãos que não funcionem bem.

Agora vem a questão interessante: como é que fazemos um mecanismo tão pequeno? Deixo-lhes isto para resolverem. Mas deixem-me sugerir uma possibilidade estranha. Sabem que nas estações de energia nuclear existem materiais e máquinas que não podem ser operadas directamente porque se tornaram radioactivas. Para desaparafusar porcas, parafusos, etc., existem conjuntos de mãos mecânicas operados por um sistema de alavancas e, deste modo, é possível manipular bem as coisas.

A maioria destes aparelhos é, na verdade, bastante simples, na medida em que há um determinado cabo, como um fio de marioneta, que vai directamente dos controlos até às mãos. Mas também já foram feitos outros, utilizando motores servo, em que a ligação entre uma coisa e as outras é eléctrica, em vez de mecânica. Quando se ligam as alavancas, estas ligam um motor servo e isso altera a corrente eléctrica nos fios, o que reposiciona um motor na outra extremidade.

Quero construir aproximadamente o mesmo dispositivo — um sistema mestre que opere electricamente. Mas quero que estes escravos sejam feitos com especial cuidado por maquinistas modernos em larga escala, de modo que tenham um quarto do tamanho das mãos que são normalmente manobradas. Assim, temos um esquema que permite fazer coisas a um quarto da escala — os pequenos motores servo, com pequenas mãos, lidam com pequenas porcas e parafusos, fazem pequenos furos, são quatro vezes mais pequenos. Ah! E construo tornos com um quarto do tamanho, faço ferramentas com um quarto do tamanho e posso fazer outro conjunto de mãos quatro vezes mais pequenas. Isto dá 1/16 do tamanho original, do meu ponto de vista. E depois de fazer isto faço a ligação directa, talvez através

dizer que podemos ir mais além em cada passo do que um para quatro, mas é claro que isto requer um planeamento muito cuidadoso e não é necessariamente simples fazer estas mãos. Se pensarem nisso com cuidado, provavelmente chegarão a um sistema muito melhor para fazer estas coisas.

Se trabalharem com um pantógrafo, mesmo hoje, podem conseguir muito mais do que um factor de quatro em apenas um passo. Mas não podem trabalhar directamente através de um pantógrafo que faz um pantógrafo mais pequeno que fará outro ainda mais pequeno devido à falta de aperto dos furos e às irregularidades de construção. A extremidade do pantógrafo ondula com uma irregularidade relativamente maior do que a irregularidade com que movemos as nossas mãos. Ao descerem nesta escala, verificariam que a extremidade do pantógrafo na extremidade da extremidade do pantógrafo tremeria tanto que não faria nada de sensível.

Em cada passo é necessário melhorar a precisão do aparelho. Se, por exemplo, tendo feito um pequeno torno com um pantógrafo, descobrimos que o parafuso mestre está irregular — mais do que o da escala normal —, podemos girar este parafuso contra porcas quebráveis que podem mover-se da maneira habitual, para a frente e para trás, até que este parafuso, à sua escala, seja tão preciso como os parafusos originais, à nossa escala.

Podemos fazer superfícies planas esfregando superfícies não planas em triplicados — em três pares — que ficarão mais planas do que as originais. Por isso não é impossível

melhorar a precisão numa escala pequena através das operações correctas. Nestas construções é necessário, em cada passo, melhorar a precisão do equipamento e trabalhá-lo um pouco, fazendo parafusos mestres adequados, blocos de Johansen e todos os outros materiais que utilizamos em máquinas precisas de alto nível. Temos de parar em cada passo e fabricar tudo o que é preciso para irmos para o próximo nível — um programa muito longo e muito difícil. Talvez consigam descobrir uma maneira melhor do que esta para descerem à pequena escala mais rapidamente.

No entanto, depois de tudo isto, apenas terão um pequeno torno bebé 4000 vezes mais pequeno do que o habitual. Mas estávamos a pensar fazer um computador enorme, que iríamos construir fazendo furos com esta ferramenta para fazer pequenas anilhas para o computador. Quantas anilhas se conseguem fazer com este torno?

Uma centena de pequenas mãos

Quando fizer o meu primeiro conjunto de mãos mecânicas a um quarto da escala, vou de facto fazer dez conjuntos. Faço dez conjuntos de mãos e ligo-as às minhas alavancas originais de modo que façam todas exactamente a mesma coisa ao mesmo tempo em paralelo. Agora, quando estiver a fazer os meus novos dispositivos, novamente quatro vezes mais pequenos, deixo cada conjunto manufacturar dez cópias, pelo que terei cem mãos com 1/16 do tamanho.

Onde é que vou pôr os milhões de tornos que vou ter? Não é um problema porque quase não existem; o volume é muito inferior ao de um só em tamanho normal. Por exemplo, se eu fizer mil milhões de pequenos tornos, cada

um a 1/4000 da escala de um torno normal, ainda haverá muito material e espaço disponíveis porque nos mil milhões estão menos de dois por cento do material presente num grande. Os materiais não custam nada. Por isso quero construir mil milhões de pequeninas fábricas, iguais umas às outras, que trabalhem simultaneamente, fazendo furos, imprimindo partes, e por aí fora.

À medida que descemos no tamanho, aparece uma série de problemas interessantes. As coisas não se reduzem de tamanho simplesmente. Acontece que os materiais se colam uns aos outros através de atracções moleculares (forças de van der Waals[18]). Seria assim: depois de termos feito uma parte e desaparafusado uma porca de um parafuso, este não se vai desagregar porque a gravidade não é apreciável; seria mesmo difícil retirar o parafuso. Era como um daqueles filmes antigos de um homem com as mãos cheias de melaço a tentar livrar-se de um copo de água. Haverá vários problemas desta natureza que teremos de estar preparados para resolver.

Rearranjando os átomos

Mas não tenho medo de considerar a questão final: se, em última análise, poderemos arranjar os átomos da maneira que queremos, os átomos, eles próprios, até ao fim! O que aconteceria se pudéssemos arranjar os átomos, um a um, da maneira que os queremos (com sentido, é claro; não podemos colocá-los de um modo quimicamente instável, por exemplo).

---

[18] Forças de van der Waals: forças de atracção fraca entre átomos ou moléculas. Johannes Diderik van de Waals recebeu o Prémio Nobel da Física de 1910 pelo seu trabalho na equação de estado para gases e líquidos.

Até agora temo-nos contentado a escavar o solo em busca de minerais. Aquecemo-los e fazemos-lhes coisas em larga escala, esperando obter uma substância pura ou com uma determinada impureza. Mas temos sempre de aceitar um determinado arranjo atómico que a natureza nos dá. Não temos nada com, digamos, um arranjo em tabuleiro de xadrez, com os átomos de impureza dispostos exactamente a mil angstroms de distância, ou qualquer outro padrão especial.

O que podíamos fazer com estruturas laminadas contendo exactamente as camadas adequadas? Quais seriam as propriedades dos materiais se pudéssemos mesmo dispor os átomos da maneira que nos apetecesse? Seriam muito interessantes de investigar teoricamente. Não consigo ver exactamente o que aconteceria, mas não posso duvidar de que quando tivermos algum *controlo* sobre o arranjo das coisas em pequena escala obteremos uma muito maior variedade de propriedades possíveis para as substâncias e de coisas que podemos fazer.

Consideremos, por exemplo, um bocado de material em que fazemos pequenas espirais e condensadores (ou os seus análogos do estado sólido), 1000 ou 10 000 angstroms num circuito, um logo a seguir ao outro, numa grande área, com pequenas antenas a espreitarem na outra extremidade — toda uma série de circuitos. Será possível, por exemplo, emitir luz de um conjunto de antenas, tal como emitimos ondas de rádio a partir de um conjunto organizado para enviar os programas de rádio para a Europa? A mesma coisa seria enviar a luz numa determinada direcção com grande intensidade (talvez este feixe não seja muito útil técnica ou economicamente).

Pensei em alguns dos problemas de construir circuitos eléctricos em pequena escala e o problema da resistência é sério. Se construirmos um circuito correspondente numa

escala pequena, a sua frequência natural sobe, uma vez que o comprimento de onda diminui com a escala, mas a profundidade de penetração da radiação diminui apenas com a raiz quadrada da escala, e daí os problemas de resistência terem dificuldade crescente. Talvez possamos combater a resistência utilizando a supercondutividade, se a frequência não for muito grande, ou utilizando outros truques.

Átomos num mundo pequeno

Quando chegamos ao mundo do muito, muito pequeno — digamos, circuitos de 7 átomos —, há uma série de coisas que podem acontecer e que representam novas oportunidades para o *design*. Os átomos numa escala pequena comportam-se como *nenhuma outra coisa* à escala normal, porque satisfazem as leis da mecânica quântica. Assim, à medida que diminuímos e brincamos com os átomos lá em baixo, trabalhamos com leis diferentes e temos de esperar fazer coisas diferentes. Podemos construir de diferentes maneiras. Podemos utilizar não apenas circuitos, mas um sistema qualquer que envolva níveis de energia quantizados, ou as interacções de *spins* quantizados, etc.

Outra coisa que vamos notar é que, se descermos o suficiente, todos os nossos dispositivos podem ser produzidos em massa, pelo que serão cópias perfeitas uns dos outros. Não conseguimos construir duas máquinas grandes com exactamente as mesmas dimensões. Mas, se a nossa máquina tiver apenas 100 átomos de altura, só precisaremos de a corrigir 0,5 por cento para termos a certeza de que a outra máquina é exactamente do mesmo tamanho — nomeadamente com 100 átomos de altura!

Ao nível atómico, temos novos tipos de forças e novas possibilidades, novos tipos de efeitos. Os problemas de

construção e reprodução de materiais serão muito diferentes. Fui, já o disse, inspirado pelos fenómenos biológicos em que as forças químicas são utilizadas de forma repetitiva para produzir todo o tipo de efeitos estranhos (um dos quais é o autor). Os princípios da física, tanto quanto consigo ver, não falam contra a possibilidade de manobrar as coisas átomo a átomo. Não é uma tentativa para violar quaisquer leis; é algo que, em princípio, pode ser feito, mas na prática ainda não o foi porque somos muito grandes.

Em última análise, podemos fazer síntese química. Chega um químico até nós e diz: «Olha, quero uma molécula que tenha os átomos arranjados desta maneira e daquela; faz-me esta molécula.» Um químico faz coisas misteriosas quando quer produzir uma molécula. Vê que tem o tal anel, por isso mistura isto e aquilo, agita e brinca com a coisa. Geralmente, no final de um processo difícil é bem sucedido na síntese daquilo que quer. Quando tivermos os nossos dispositivos a funcionar e pudermos fazê-lo através da física, ele terá descoberto o modo de sintetizar praticamente tudo, pelo que isto é realmente inútil.

Mas é interessante que, em princípio, seja possível a um físico sintetizar uma substância qualquer que um químico escreva. Dê as ordens que o físico sintetiza-o. Como? Dispondo os átomos do modo indicado pelo químico e fazendo a substância. Os problemas da química e da biologia poderão ser grandemente ajudados se desenvolvermos a nossa capacidade de ver o que estamos a fazer e de fazer coisas ao nível atómico — um desenvolvimento que penso que não pode ser evitado. Agora podem dizer: «Quem deveria fazer isto e porquê?» Bem, apontei algumas das aplicações económicas, mas sei que a razão pela qual o fariam poderia ser apenas pelo gozo. Então divirtam-se! Vamos fazer uma competição entre laboratórios. Um laboratório que faça um pequeno motor e o envie para outro laboratório

que o envie de volta com alguma coisa que caiba dentro do eixo do primeiro.

Competição de liceu

Só pelo prazer que dá e para manter os miúdos interessados neste campo, vou propor que alguém que tenha contacto com os liceus pense em fazer uma competição. Afinal de contas, ainda não começámos nada neste campo e mesmo os miúdos conseguem escrever mais pequeno do que alguma vez foi conseguido antes. Poderiam ter a competição nos liceus. O liceu de Los Angeles poderia enviar um alfinete para o de Venice em que dissesse: «Que tal isto?» E eles enviariam o alfinete de volta, escrevendo na pinta do «i»: «Nada de especial.»

Talvez isto não os excite para o fazerem e apenas a economia o consiga. Então quero fazer o seguinte... mas não posso fazê-lo agora porque não preparei o terreno. É minha intenção oferecer um prémio de 1000 dólares ao primeiro que consiga colocar a informação de uma página de um livro numa área 25 000 vezes mais pequena, numa escala linear, de modo que possa ser lida por um microscópio electrónico.

E quero oferecer outro prémio — se conseguir descobrir como é que hei-de pôr o problema de modo a não me enfiar numa discussão sobre definições — de outros 1000 dólares ao primeiro que faça um motor eléctrico que funcione — um motor eléctrico de rotação que possa ser controlado do exterior e que, não contando com os fios de alimentação, tenha apenas 1/64 polegadas cúbicas (0,256 centímetros cúbicos).

Não espero que demore muito tempo até estes prémios serem reclamados.

5
O que é a ciência?

O que é a ciência? É senso comum! Ou não? Em Abril de 1966 o professor mestre, dirigindo-se à Associação Nacional de Professores de Ciências, falou aos seus colegas sobre o modo de ensinar os estudantes a pensarem como cientistas e a verem o mundo com curiosidade, abertura de espírito e, acima de tudo, dúvida. Esta conferência é também um tributo à enorme influência que o pai de Feynman — um simples vendedor de uniformes — teve na sua maneira de ver o mundo.

Agradeço ao Sr. DeRose pela oportunidade de me juntar a todos os presentes, professores de ciências. Também sou professor de ciências. Tenho muita experiência a ensinar estudantes de licenciatura em física e, em resultado dessa mesma experiência, sei que não sei como ensinar.

Tenho a certeza de que são professores a sério, que trabalham no nível básico desta hierarquia de professores, instrutores de professores, especialistas em currículos, e

«como ensinar ciência» e devo chamar-lhes a atenção para isso por duas razões. Em primeiro lugar, pela maneira como estou a preparar-me para dar esta conferência pode parecer que estou a tentar dizer-lhes como devem ensinar — e não estou de modo algum porque não sei nada sobre crianças pequenas. Tenho uma e por isso sei que não sei nada. Em segundo lugar, penso que a maioria dos presentes (porque há tanta conversa, tantos artigos e especialistas neste campo) sente uma espécie de falta de autoconfiança. De certo modo, estão sempre a ouvir que as coisas não estão a correr muito bem e que deviam aprender a ensinar melhor. Não vou reprová-los pelo mau trabalho que estão a fazer e dizer como é que pode ser definitivamente melhorado; não é essa a minha intenção.

Na verdade, temos muito bons estudantes a virem para Caltech e, com o passar dos anos, achamo-los cada vez melhores. Agora, como é que isto é feito, não sei. Interrogo-me se também o saberão. Não quero interferir com o sistema, que é muito bom.

Há dois dias tivemos uma conferência em que decidimos que já não temos de ensinar uma disciplina elementar de mecânica quântica na pós-graduação. Quando era estudante, nem sequer havia uma disciplina de mecânica quântica; era considerado um assunto muito difícil. Quando comecei a ensinar, tínhamos uma. Agora ensinamo-la aos alunos de licenciatura. Descobrimos agora que não precisamos de ter mecânica quântica elementar para os licenciados das outras escolas. Por que é que isto tem sido puxado para baixo? Porque somos capazes de ensinar

melhor na universidade e isso acontece porque os alunos chegam cá mais bem treinados.

O que é a ciência? É claro que todos devem saber, já que a ensinam. O que posso dizer? Se não sabem, qualquer edição do professor de um livro de texto contém uma discussão completa sobre o assunto. Há uma espécie de destilação distorcida, diluição e mistura das palavras de Francis Bacon de há alguns séculos, palavras que na altura era suposto serem a filosofia profunda da ciência. Mas um dos grandes cientistas experimentais da época, que estava de facto a fazer alguma coisa, William Harvey[19], disse que o que Bacon dizia que era a ciência era a ciência que um lorde faria. Ele falou sobre fazer observações, mas omitiu o elemento vital do julgamento sobre o que observar e ao que prestar atenção.

E assim o que a ciência é não é o que os filósofos têm dito e certamente não é o que diz a edição do professor. É sim um problema que pus a mim próprio depois de aceitar dar esta conferência. Algum tempo depois lembrei-me deste pequeno poema:

> Uma centopeia estava feliz até que um sapo, por prazer,
> Disse: Qual é a perna que vem a seguir à primeira?
> Isto levantou tantas dúvidas na centopeia
> Que se sentiu distraída de tal maneira
> Que já não sabia como correr.

Toda a minha vida tenho feito ciência e sabido aquilo que é, mas agora que vim aqui dizer-lhes — que pé vem a seguir ao outro — sou incapaz de o fazer e, portanto, estou preocupado com a analogia com o poema e de voltar para casa e não ser capaz de fazer investigação.

---

[19] Que descobriu o sistema circulatório do corpo humano.

Tem havido uma série de tentativas por parte de vários repórteres da imprensa para conseguirem uma espécie de cápsula desta conferência. Como a preparei há pouco tempo, tal foi impossível, mas já estou a vê-los a correr para escreverem um cabeçalho que diga: «Professor chama sapo ao presidente da NSTA.»

Nestas circunstâncias de dificuldade do assunto, e dado o meu desgosto pela exposição filosófica, vou apresentá-lo de um modo pouco habitual. Vou apenas dizer-lhes como é que aprendi o que é a ciência. É um bocadinho infantil. Aprendi-o quando era criança. Tenho-o no meu sangue desde o início e gostaria de lhes dizer como é que entrou. Isto soa como se estivesse a tentar dizer-lhes como devem ensinar, mas não é essa a minha intenção. Vou dizer-lhes como é a ciência através da maneira como a aprendi.

O meu pai fê-lo para mim. Quando a minha mãe estava grávida, diz-se — não estou directamente ciente da conversa — que o meu pai disse: «Se for um rapaz, será um cientista.» Como é que ele fez? Nunca me disse que devia ser um cientista. Ele não era um cientista, era um homem de negócios, um vendedor de uma empresa de uniformes, mas lia sobre ciência e adorava-a.

Quando era muito novo — a primeira história de que me lembro —, quando ainda comia na cadeira alta, o meu pai jogava um jogo comigo depois do jantar. Ele tinha comprado uma série de azulejos rectangulares de casa de banho num sítio qualquer na cidade de Long Island. Dispúnhamos os azulejos, um a seguir a outro, e eu tinha o direito de empurrar o último para ver a coisa toda a cair. Até aqui tudo bem.

A seguir, o jogo melhorava. Os azulejos tinham cores diferentes. Eu tinha de pôr um branco, dois azuis, um branco, dois azuis, outro branco e depois dois azuis — podia querer pôr outro azul, mas tinha de ser um branco.

Reconhecem já a esperteza interna e insidiosa da coisa: primeiro diverte-o com a brincadeira e depois, lentamente, injecta material com valor educativo.

A minha mãe, que é uma mulher muito mais sensível, começou a perceber a insinuação dos seus esforços e disse: «Mel, por favor, deixa a pobre criança colocar um azulejo azul, se ela quer assim.» E o meu pai disse: «Não, quero que ele preste atenção aos padrões. É a única coisa matemática que posso fazer a este nível.» Se estivesse a dar uma conferência sobre «o que é a matemática», já lhes teria respondido. A matemática procura padrões.

O facto é que esta educação teve algum efeito. Tínhamos um teste experimental na altura em que fui para o infantário. Nesses tempos tínhamos tecelagem, agora tiraram-no, é muito difícil para as crianças. Costumávamos tecer papel colorido com fitas verticais e construir padrões. A professora do infantário ficou tão espantada que enviou uma carta especial para a minha casa a dizer que esta criança era muito diferente porque parecia perceber antes do tempo qual seria o padrão e fazia padrões incrivelmente complicados. Por isso o jogo dos azulejos serviu-me de alguma coisa.

Gostaria de falar de outras evidências de que a matemática são apenas padrões. Quando estava em Cornell, fascinava-me o corpo estudantil, que parecia ser uma mistura diluída de algumas pessoas sensatas numa grande massa de tolos que estudavam economia nacional, etc., incluindo muitas raparigas. Costumava sentar-me na cafetaria com os estudantes, comíamos e tentávamos ouvir as conversas delas e ver se saía alguma palavra inteligente. Podem imaginar a minha surpresa quando descobri uma coisa tremenda, segundo me pareceu.

Ouvi uma conversa entre duas raparigas e uma explicava que, se queríamos fazer uma linha direita, estás a ver,

andas um certo número para a direita por cada rosa que sobes, ou seja, se, de cada vez, andar a mesma quantidade quando se sobe uma linha, faz-se uma linha direita. Um princípio profundo de geometria analítica! E continuou. Estava fascinado. Não sabia que a mente feminina era capaz de compreender geometria analítica.

Ela continuou e disse: «Supõe que tens outra linha a vir do outro lado e queres saber onde é que se vão encontrar.» Supõe que numa linha andas dois para a direita por cada uma que sobes, e a outra linha anda três para a direita por cada uma que sobe, e começam com vinte passos de diferença, etc. Estava estupefacto! Ela descobriu onde acontecia a intersecção! Verificou-se que esta rapariga estava a ensinar à outra como tricotar meias.

E eu, portanto, aprendi uma lição: a mente feminina é capaz de compreender geometria analítica. Aquelas pessoas que há anos insistem (apesar de toda a evidência em contrário) em que os homens e as mulheres são iguais e capazes de pensamento racional talvez tenham alguma razão. A dificuldade pode ser apenas que não tenha sido descoberta uma maneira de comunicar com a mente feminina. Se for feito da maneira certa, podemos conseguir alguma coisa dela.

Agora vou continuar com a minha própria experiência de criança na matemática.

Outra coisa que o meu pai me disse — e não consigo bem explicá-lo porque era mais uma emoção do que uma conversa — foi que a razão da circunferência para o diâmetro dos círculos é sempre a mesma, não importa o tamanho. Isso não me parecia demasiado esquisito, mas esta razão tinha uma propriedade maravilhosa. Era um número maravilhoso, um número profundo, π. Havia um mistério acerca deste número que eu não compreendia muito bem enquanto jovem, mas era uma coisa fantástica e o resultado foi eu procurar o π em todo o lado.

Mais tarde, quando aprendia na escola como fazer os decimais das fracções e como resolver $3\frac{1}{8}$, escrevi 3,125, e, pensando bem, um amigo escreveu que era igual a π, a razão da circunferência para o diâmetro de um círculo. O professor corrigiu-o para 3,1416.

Falo destas coisas para mostrar uma influência. A ideia de que há um mistério, uma maravilha acerca do número, era importante para mim, e não que número era. Muito mais tarde, quando estava a fazer experiências no laboratório — falo do meu próprio laboratório em casa —, não, desculpem-me, não fazia experiências, nunca fiz, apenas me divertia, fazia rádios e engenhocas, brincava com aquilo — gradualmente, através de livros e manuais, comecei a descobrir que havia fórmulas que se aplicavam à electricidade para relacionar a corrente e a resistência, e por aí fora. Um dia, ao olhar para as fórmulas num livro ou noutro, descobri uma para a frequência de um circuito ressonante que era $2\pi\sqrt{LC}$, em que L é a indutância e C a capacitância do circuito. E havia π, mas onde é que estava o círculo? Riem-se, mas eu na altura estava muito sério. π era uma coisa com círculos e aqui estava o π a vir de um circuito eléctrico. Riem-se, mas sabem donde é que vem o π?

Tinha de adorar a coisa. Tinha de procurá-la. Tinha de pensar sobre aquilo. E depois percebi, é claro, que as bobinas são feitas em círculos. Cerca de meio ano mais tarde encontrei outro livro que me deu a indutância de bobinas redondas e quadradas e havia outros π nestas fórmulas. Comecei a pensar nisso outra vez e compreendi que o π não vinha das bobinas circulares. Agora compreendo-o melhor, mas no meu coração ainda não sei bem onde é que está aquele círculo, donde vem aquele π.

Gostaria de dizer uma palavra ou duas — vou interromper a minha pequena história — sobre palavras e

definições, porque é necessário aprender as palavras. Não é ciência. Mas só porque não é ciência não quer dizer que não tenhamos de ensinar as palavras. Não estamos a falar sobre o que ensinar, mas sobre o que é a ciência. Não é ciência saber como converter graus centígrados em Fahrenheit. É necessário, mas não é exactamente ciência. Do mesmo modo, se estivesse a discutir o que é a arte, não diriam que é o conhecimento de que um lápis 3B é mais macio do que um 2H. Há uma diferença distinta. Não quer dizer que o professor de arte não deva ensinar isso, ou que um artista passe muito bem não o sabendo (na verdade, podem descobrir qual é a mina experimentando-a, mas isso é um método científico que os professores de arte podem não se lembrar de explicar).

Para falarmos uns com os outros necessitamos de palavras, e isso está certo. É uma boa ideia tentar ver a diferença e é uma boa ideia saber quando é que estamos a ensinar as ferramentas da ciência ou quando é que estamos a ensinar a própria ciência.

Para tornar este aspecto ainda mais claro vou escolher um determinado livro de ciência para criticar, o que é injusto, porque estou certo de que, com alguma ingenuidade, consigo encontrar coisas igualmente desfavoráveis para dizer sobre os outros.

Há um livro de ciência para a 1.ª classe que, na primeira lição, começa de uma maneira infeliz a ensinar ciência porque começa com a ideia errada do que é a ciência. Há uma imagem de um cão, um cão de corda de brincar, e aparece uma mão na chave e o cão começa a mover-se. Sob a última imagem diz: «O que é que o faz mover-se?» Mais tarde, há outra figura de um cão verdadeiro e a questão é «o que é que o faz mover-se?», e por aí fora.

A princípio pensei que estavam a preparar-se para dizer do que trata a ciência: física, biologia, química. Mas não

era isso. A resposta estava na edição do professor; a resposta que eu tentava aprender era que «a energia é o que o faz mover-se».

Ora a energia é um conceito muito subtil. É muito, muito difícil de apreender correctamente. O que quero dizer com isto é que não é fácil compreender suficientemente a energia para usar o conceito correctamente, de modo a deduzir alguma coisa como deve ser utilizando a ideia da energia. Está para além da 1.ª classe. Estaria igualmente bem dizer que «Deus fá-lo mover-se», ou «o espírito fá-lo mover-se», ou «a mobilidade fá-lo mover-se» (na verdade, seria igualmente correcto dizer «a energia fá-lo parar»).

Vejam-no desta forma: trata-se apenas da definição de energia. Devia ser ao contrário. Podemos dizer que quando alguma coisa se move tem energia, mas não que é a energia que o faz mover-se. Esta é uma diferença muito subtil. Passa-se o mesmo com esta proposição sobre a inércia. Talvez consiga tornar a diferença um pouco mais clara deste modo: perguntem a uma criança o que é que faz o cão mover-se, perguntem a um ser humano normal o que é que faz o cão mover-se, é sobre isto que devem pensar. A resposta é que se dá corda e o mecanismo empurra a engrenagem para a frente. Que óptima maneira de começar uma disciplina de ciência. Desfaçam o brinquedo, vejam como funciona. Vejam o engenho das engrenagens. Aprendam alguma coisa sobre o brinquedo, o modo como é feito, a ingenuidade das pessoas ao imaginarem-no e outras coisas. Isso é bom. A pergunta está certa. A resposta é um bocado infeliz porque o que estão a tentar fazer é ensinar uma definição do que é a energia. Mas nada é aprendido.

Suponhamos que um estudante diz: «Não acho que seja a energia que o faz mover-se.» Para onde é que segue a discussão a partir daqui?

Finalmente, descobri uma maneira de testar se ensinaram uma ideia ou uma definição. O teste é assim: «Sem utilizarem a nova palavra que aprenderam, tentem explicar aquilo que aprenderam nas vossas próprias palavras.» Sem utilizarem a palavra *energia,* digam-me o que sabem sobre o movimento do cão. Não podem. Por isso não aprenderam nada, excepto a definição. Não aprenderam nada sobre ciência. Pode estar tudo bem, podem não querer aprender logo seja o que for sobre ciência. Têm de aprender as definições. Mas para uma primeira lição não será possivelmente destrutivo?

Penso que, para a primeira lição, aprender uma fórmula mística de responder à pergunta é muito mau. O livro tem outras coisas — «a gravidade fá-lo cair», «as solas dos teus sapatos gastam-se devido à fricção». A pele dos sapatos gasta-se porque se esfrega contra o passeio e as pequenas depressões e saliências do passeio agarram bocados e arrancam-nos. Dizer apenas que é por causa da fricção é triste, porque não é ciência.

O meu pai lidou um pouco com a energia e utilizou o termo depois de eu ter percebido um pouco da ideia. O que ele teria feito eu sei porque ele fez essencialmente a mesma coisa, embora não com o mesmo exemplo do cão de brincar.

Ele diria «move-se porque o Sol está a brilhar», se quisesse ensinar a mesma lição.

Eu diria: «Não. O que é que tem a ver com o Sol a brilhar? Moveu-se porque lhe dei corda.»

«E porquê, meu amigo, és capaz de te mover para lhe dar corda?»

«Eu como.»

«O que é que tu comes, meu amigo?»

«Como plantas.»

«E como é que elas crescem?»

«Crescem porque o Sol está a brilhar.»

E é o mesmo com o cão. Então e a gasolina? Energia do Sol acumulada que é captada pelas plantas e preservada no chão. Outros exemplos, todos acabam com o Sol. E, assim, a mesma ideia acerca do mundo que o nosso Sol anima é posta de um modo muito excitante. Todas as coisas que vemos a moverem-se movem-se porque o Sol brilha. Explica a relação de uma fonte de energia com outra e pode ser negada pela criança. Ela poderia dizer: «Não acho que seja por causa de o Sol brilhar.» E podemos começar uma discussão. Por isso há uma diferença. Mais tarde posso desafiá-la com as marés e com o que faz a Terra girar e tenho o mistério na mão mais uma vez.

Este é apenas um exemplo da diferença entre as definições, que são necessárias, e a ciência. A única objecção neste caso em particular é que era a primeira lição. Tem certamente de vir mais tarde dizer o que é a energia, mas não em resposta a uma pergunta simples como «o que é que faz o cão mover-se?». Uma criança daria uma resposta de criança: «Abre-o, vamos vê-lo.»

Durante aqueles passeios nos bosques aprendi muito. No caso dos pássaros, por exemplo — já mencionei a migração, mas vou dar outro exemplo com pássaros nos bosques. Em vez de lhes dar nome, o meu pai diria: «Olha, repara que o pássaro está sempre a bicar nas penas. Ele bica muito nas penas. Por que achas que faz isso?»

Respondi-lhe que era porque as penas estavam embaraçadas e ele tentava alisá-las. Ele disse: «OK, quando é que as penas ficaram embaraçadas ou como é que ficam assim?»

«Quando voa. Quando anda por aí não faz mal, mas quando voa as penas ficam emaranhadas».

Então ele diria: «Então achas que quando o pássaro aterrar tem de bicar mais as penas do que quando acabou

de as endireitar e andou no chão de um lado para o outro. Ok, vamos ver.»

E então observámos e vimos, tanto quanto eu conseguia perceber, que o pássaro bicava as penas as mesmas vezes, não importava há quanto tempo andava no chão, e não imediatamente após o voo.

Por isso a minha hipótese estava errada e não conseguia adivinhar a razão correcta. O meu pai revelou a razão.

É que os pássaros têm piolhos. Há um pequeno floco que se liberta da pena, ensinou-me, algo que pode ser comido, e o parasita come-o. E nas articulações do parasita, entre as secções da perna, há um pouco de cera que escorre e há um piolho que vive aí a comer a cera. O piolho tem uma fonte de comida tão boa que não a digere muito bem e da extremidade traseira sai um líquido que tem muito açúcar e nesse açúcar vive uma criatura muito pequenina, etc.

Os factos não estão correctos. O espírito está. Primeiro aprendi sobre o parasitismo, um no outro, no outro, no outro.

Em segundo lugar, ele continuou a dizer que no mundo, sempre que há uma fonte de alguma coisa que possa ser consumida, há uma forma de vida que encontra uma maneira de fazer uso dela e que cada bocadinho que sobra é comido por alguém.

O significado disto é que o resultado da observação, mesmo que eu não fosse capaz de chegar a uma conclusão final, era uma peça de ouro, um resultado maravilhoso. Era algo de maravilhoso.

Suponham que me tinham dito para observar, para fazer uma lista, para escrever, para fazer isto, para ver e, quando escrevesse a minha lista, era arquivada com mais 130 listas nas costas do meu bloco de notas. Eu aprenderia que o resultado da observação é relativamente aborrecido, que não sai daí grande coisa.

Acho que é muito importante — pelo menos era para mim — que, se queremos ensinar as pessoas a fazerem observações, devemos mostrar que algo de maravilhoso poderá surgir.

Aprendi então o que era a ciência. Era paciência. Se olhássemos e prestássemos atenção, teríamos uma grande recompensa (embora não todas as vezes). Como resultado, quando me tornei um homem maduro, trabalhei laboriosamente, hora após hora, durante anos, nos problemas — umas vezes muitos anos, outras menos tempo —, muitos deles falhados, muita coisa a acabar no cesto dos papéis, mas de vez em quando havia a recompensa de uma nova compreensão, que aprendi a aguardar quando era miúdo, o resultado da observação. Porque não aprendi que a observação não valia a pena.

Incidentalmente, na floresta aprendemos outras coisas. Íamos passear e víamos coisas normais e falávamos de muitas coisas, sobre as plantas que cresciam, a luta das árvores pela luz, como tentavam chegar o mais alto possível e resolver o problema de levarem a água a mais de 35 ou 40 pés de altura, as pequenas plantas no chão que procuram os bocadinhos de luz que passam, tudo o que cresce, etc.

Um dia tínhamos visto isto tudo e o meu pai levou-me outra vez à floresta e disse-me: «Durante todo este tempo em que temos observado a floresta vimos apenas metade daquilo que se passa, exactamente metade.»

«O que queres dizer?», perguntei-lhe.

Ele disse-me: «Temos visto como é que todas estas coisas crescem, mas por cada bocadinho de crescimento tem de haver a mesma quantidade de degradação, pois de outro modo os materiais seriam consumidos para sempre. As árvores mortas ficariam ali depois de terem usado tudo o que podiam do ar e do chão e nada voltaria para o chão

e para o ar e nada mais podia crescer porque não haveria material suficiente. Para cada bocadinho de crescimento tem de haver a mesma quantidade de degradação.»

E seguiram-se muitos passeios nos bosques, durante os quais partíamos velhos troncos, víamos vermes engraçados e fungos a crescer. Ele não podia mostrar-me as bactérias, mas víamos os efeitos da sua acção, e assim sucessivamente. Vi a floresta como um processo de reciclagem constante de materiais.

Havia muitas coisas destas, descrições de coisas de maneiras estranhas. Ele começava muitas vezes a falar de uma coisa deste modo: «Supõe que vem cá um homem de Marte ver o mundo.» É uma óptima maneira de ver o mundo. Por exemplo, quando brincava com o meu comboio eléctrico, ele disse-me que havia uma grande roda a ser girada pela água que está ligada por filamentos de cobre, que se estendem e estendem em todas as direcções; depois há pequenas rodas e todas elas giram quando a roda grande gira. A relação entre elas é feita apenas por cobre e ferro, nada mais, sem partes móveis. Giras uma roda aqui e todas as rodinhas giram em todo o lado e o teu comboio é uma delas. Foi um mundo maravilhoso aquele de que o meu pai me falou.

O que é a ciência, penso que poderá ser algo como isto: houve neste planeta uma evolução da vida até ao ponto em que se desenvolveram animais que são inteligentes. Não falo apenas de seres humanos, mas de animais que brincam e conseguem aprender alguma coisa com a experiência (como os gatos). Mas a dada altura cada animal teve de aprender com a sua própria experiência. Desenvolveram-se gradualmente até um animal poder aprender mais rapidamente e poder mesmo aprender com a experiência de outro pela observação, ou um poder mostrar ao outro,

ou um ver o que o outro tinha feito. Assim, houve a possibilidade de todos aprenderem, mas a transmissão não era eficiente e morriam, e talvez aquele que aprendeu morresse também antes de poder passar aos outros o que aprendera.

A questão é: será possível aprender mais rapidamente (o que alguém aprendeu por acidente) do que a taxa a que o assunto é esquecido, seja por má memória, seja pela morte do aprendiz ou inventor?

E então chegou uma altura em que, para algumas espécies, a taxa a que aumentava a aprendizagem fez com que acontecesse uma coisa completamente nova: as coisas podiam ser aprendidas por um animal e passadas para outro e outro de uma forma suficientemente rápida para não se perderem. E tornou-se possível acumular conhecimento.

Isto foi designado por *time-bending* (curvatura do tempo). Não sei quem lhe chamou assim em primeiro lugar. Temos aqui algumas amostras desses animais, sentados a tentarem ligar uma experiência à outra, cada um a tentar aprender com o outro.

Este fenómeno de ter uma memória, de ter conhecimento acumulado que passa de uma geração para outra, era novo no mundo. Mas continha uma doença. Era possível transmitir ideias erradas. Era possível passar ideias que não eram lucrativas para a raça. A raça tem ideias, mas estas não são necessariamente benéficas.

Então chegou uma altura em que as ideias, embora se acumulassem lentamente, eram todas acumulações não apenas de coisas práticas e úteis, mas grandes acumulações de todo o tipo de preconceitos e crenças estranhas e anormais.

Descobriu-se então um meio de evitar a doença. Isto é, duvidar de que o que é transmitido do passado seja de facto verdade e tentar perceber, *ab initiio,* novamente a partir da experiência, qual é a situação, em vez de acreditar na experiência do passado, sob a forma que é transmi-

tida. E é isso que é a ciência: o resultado da descoberta de que vale a pena verificar novamente através da experiência directa e não necessariamente acreditar na experiência passada da raça. Vejo-o desta maneira. Esta é a minha melhor definição.

Gostaria de lhes lembrar todas as coisas que conhecem bem para lhes dar um pouco de entusiasmo. Na religião, as lições morais são ensinadas, mas não são ensinadas apenas uma vez — somos inspirados uma e outra vez, e acredito que é preciso inspirar uma e outra vez e lembrar o valor da ciência às crianças, aos crescidos, a toda gente, de muitas maneiras, não apenas que seremos melhores cidadãos, capazes de controlar a natureza, e assim. Existem outras coisas.

Há o valor da visão do mundo criada pela ciência. Há a beleza e a maravilha do mundo que é descoberto em resultado destas novas experiências. O mesmo é dizer as maravilhas daquilo que acabei de lhes lembrar, que as coisas se movem porque o Sol brilha, que é uma ideia profunda, muito estranha e maravilhosa (no entanto, nem todas as coisas se movem porque o Sol brilha; a Terra gira independentemente de o Sol brilhar e as reacções nucleares produziram recentemente energia na Terra, uma nova fonte; provavelmente, os vulcões movem-se a partir de uma fonte diferente do brilho do Sol).

O mundo parece tão diferente depois de aprendermos ciência. Por exemplo, as árvores são, basicamente, feitas de ar. Quando são queimadas, voltam ao ar e nas chamas quentes é libertado o calor do Sol que estava acumulado para converter o ar em árvores e nas cinzas estão os restos da parte que não veio do ar, que veio da terra sólida.

Estas são coisas lindas e os conteúdos da ciência estão cheios delas. São muito inspiradoras e podem ser utilizadas para inspirar outros.

Outra das qualidades da ciência é que ensina o valor do pensamento racional, assim como a importância da liberdade de pensamento; os resultados positivos que provêm de duvidar de que todas as lições são verdadeiras. Aqui devemos distinguir — especialmente no ensino — a ciência dos procedimentos que são muitas vezes utilizados no desenvolvimento da ciência. É fácil dizer: «Escrevemos, experimentamos, observamos, fazemos isto ou aquilo.» Podemos copiar a forma exactamente. Mas grandes religiões são dissipadas por seguirem a forma sem lembrarem o conteúdo directo dos ensinamentos dos líderes. Do mesmo modo, é possível seguir a forma e chamar-lhe ciência, sendo pseudociência. Assim, todos nós sofremos o tipo de tirania que hoje temos em muitas instituições que estão sob a influência de conselheiros pseudocientíficos.

Temos muitos estudos no ensino, por exemplo, em que as pessoas fazem observações, listas e estatísticas, mas que não se tornam ciência estabelecida, conhecimento estabelecido. São apenas uma forma imitativa da ciência — como os habitantes dos mares do Sul que fizeram campos de aviação e torres de rádio de madeira, esperando a chegada de um grande avião. Até construíram aviões de madeira com a mesma forma que vêem nos campos internacionais à sua volta, mas estes, estranhamente, não voam. O resultado desta imitação pseudocientífica é produzir especialistas.

Os professores que estão realmente a ensinar as crianças na base da pirâmide talvez possam duvidar de vez em quando dos especialistas. Aprendam com a ciência que se deve duvidar dos especialistas. Na verdade, também posso definir a ciência de outro modo: a ciência é a crença na ignorância dos especialistas.

Quando alguém diz que a ciência ensina isto e aquilo está a utilizar a palavra incorrectamente. A ciência não ensina, a experiência ensina. Se lhes disserem que a ciência

mostrou isto e aquilo, podem perguntar «como é que a ciência o mostrou, como é que os cientistas descobriram — como, o quê, onde?». Não foi a ciência que mostrou, mas esta experiência, este efeito. E têm tanto direito como outra pessoa qualquer, após ouvirem as experiências (mas temos de ouvir *toda* a evidência), de julgar se se chegou a uma conclusão reutilizável.

Num campo que é tão complicado que a verdadeira ciência não é capaz de chegar a lado nenhum temos de confiar numa espécie de sabedoria antiquada. Estou a tentar inspirar o professor da base a ter alguma esperança e alguma autoconfiança no senso comum e na inteligência natural. Os especialistas podem estar errados.

Provavelmente, arruinei o sistema e agora os estudantes que forem para Caltech já não serão bons. Penso que vivemos numa era não científica em que quase todas as comunicações, livros, etc., são não científicos. Isso não quer dizer que sejam maus, mas são não científicos. Como resultado, há uma quantidade considerável de tirania intelectual em nome da ciência.

Finalmente, no que respeita a este *time-bending,* um homem não pode viver para além da sepultura. Cada geração que descobre algo a partir da sua experiência deve transmiti-lo, mas fazê-lo com um equilíbrio delicado de respeito e desrespeito, de modo que a raça (agora que está alerta para a doença que a atinge) não inflija os seus erros de forma demasiado rígida na sua juventude, mas transmita a sabedoria acumulada, mais a sabedoria que talvez não seja sabedoria.

É necessário ensinar tanto a aceitar como a rejeitar o passado com um equilíbrio que requer qualidades consideráveis. A ciência, a de todos os assuntos, contém em si própria a lição do perigo na crença da infalibilidade dos grandes professores da geração anterior.

Por isso continuem. Muito obrigado.

6

O homem mais inteligente do mundo

Esta é a magnífica entrevista dada por Feynman em 1979 à revista Omni. *É Feynman naquilo que melhor conhece e aprecia — a física — e naquilo de que gosta menos — a filosofia! («Os filósofos deviam aprender a rir-se de si próprios.») Aqui Feynman discute o trabalho que lhe deu o prémio Nobel, a electrodinâmica quântica (ou «QED»), e depois parte para a cosmologia, os quarks e aquelas infinidades trabalhosas que aglutinam as equações.*

«Acho que a teoria é apenas uma maneira de varrer as dificuldades para debaixo do tapete», disse Richard Feynman. «Claro que não estou certo disto.» Soa como aquele tipo de crítica, temperado de ritual, que vem da assistência depois da apresentação de um trabalho controverso numa conferência científica. Mas Feynman estava no pódio, a fazer um discurso de aceitação do prémio Nobel. A teoria que estava a questionar, a electrodinâmica

quântica, fora recentemente nomeada como «a mais precisa alguma vez planeada» e as suas previsões são verificadas rotineiramente.

Quando Feynman, Julian Schwinger e Sin-Itiro Tomonaga a desenvolveram, independentemente, nos anos 40, os colegas aclamaram-na como «a grande limpeza»: a resolução de problemas de longa data e uma fusão rigorosa das duas grandes ideias da física do século XX, a relatividade e a mecânica quântica.

Feynman combinou o brilho intelectual com um irreverente cepticismo ao longo da sua carreira. Em 1942, depois de fazer o doutoramento em Princeton com John Wheeler, foi incluído no projecto Manhattan. Em Los Alamos era um miúdo brilhante de 25 anos, desassombrado pelos titãs da física à sua volta (Niels Bohr[20], Enrico Fermi[21], Hans Bethe[22]) e pouco impressionado pela urgência ultra-secreta do projecto. O pessoal da segurança sofria com a sua facilidade de abrir cofres — umas vezes através da audição dos pequenos movimentos do mecanismo, outras adivinhando qual a constante física que o utilizador tinha escolhido como combinação (Feynman não mudou desde aí; muitos dos seus estudantes em Caltech adquiriram capacidades de arrombamento juntamente com os conhecimentos da física).

---

[20] (1885–1962) Prémio Nobel da Física de 1922 pelo seu trabalho na estrutura dos átomos e da radiação que deles emana.

[21] (1901–1954) Prémio Nobel da Física de 1938 por demonstrar a existência de novas substâncias radioactivas produzidas pela irradiação de neutrões e trabalho relacionado. Fermi foi também responsável pela primeira reacção nuclear controlada na Universidade de Chicago em Dezembro de 1942.

[22] (1906–) Prémio Nobel da Física de 1967 pelas contribuições para a teoria das reacções nucleares, especialmente pelas suas descobertas sobre a produção de energia nas estrelas.

Depois da guerra, Feynman trabalhou na Universidade de Cornell. Aí, tal como ele relata na entrevista, Bethe foi o catalisador para as suas ideias na resolução do «problema das infinidades». Os níveis precisos de energia dos electrões nos átomos de hidrogénio e as forças entre os electrões (que se movem tão rapidamente que as alterações relativísticas tinham de ser tomadas em consideração) tinham já sido o tema de trabalho pioneiro durante três décadas.

Cada electrão, dizia a teoria, estava rodeado de «partículas virtuais» transientes cuja massa-energia era convocada a partir do vácuo; por sua vez, estas partículas originavam outras e o resultado é uma cascata matemática que previa uma carga infinita para cada electrão. Tomonaga sugeriu uma forma de contornar o problema em 1943 e as suas ideias tornaram-se conhecidas ao mesmo tempo que Feynman, em Cornell, e Schwinger, em Harvard, davam o mesmo passo crucial. Os três partilharam o Prémio Nobel da Física de 1965. Por essa altura, já as ferramentas matemáticas de Feynman, os «integrais de Feynman» e os diagramas que inventou para traçar as interacções das partículas, faziam parte do equipamento de qualquer físico teórico. O matemático Stanislaw Ulman, outro dos veteranos de Los Alamos, cita os diagramas de Feynman como «a notação que empurra o pensamento em direcções que podem vir a ser úteis ou mesmo novas e decisivas». A ideia de partículas que viajam para trás no tempo, por exemplo, é um resultado natural desta notação.

Em 1950, Feynman mudou-se para Caltech, em Pasadena. O seu sotaque ainda é, sem sombra de dúvida, o do nova-iorquino transplantado, mas o Sul da Califórnia parece ser o *habitat* apropriado para ele: entre as «histórias de Feynman» que os colegas contam, as do gosto por Las Vegas e pela vida nocturna em geral têm fama.

«A minha mulher não queria acreditar que eu de facto tinha aceite fazer um discurso para o qual tinha de usar smoking», disse ele. «Mudei de ideias um par de vezes.» No prefácio de *As Palestras de Feynman sobre a Física,* largamente utilizado como livro de texto desde que estas foram coligidas e publicadas em 1963, ele aparece com um sorriso maníaco a tocar tambores conga (diz-se que nos bongos ele consegue tocar dez ritmos com uma mão e onze com a outra; se o tentarem, poderão ver que a electrodinâmica quântica é mais fácil).

Entre os outros feitos de Feynman está a sua contribuição para as alterações de fase do hélio superenrolado e o seu trabalho com o colega de Caltech Murray Gell-Mann[23] sobre a teoria do decaimento beta dos núcleos atómicos. Ambos os assuntos estão ainda longe da resolução final, lembra ele. Na verdade, ele não hesita em chamar à própria electrodinâmica quântica um «embuste» que deixa importantes questões lógicas por responder. Que tipo de homem pode fazer um trabalho deste calibre enquanto alimenta as dúvidas mais penetrantes? Leiam e descubram.

Omni — Para alguém que olhe de fora para a física das altas energias, o objectivo parece ser encontrar os constituintes fundamentais da matéria. Lembra uma demanda que podemos remontar ao átomo dos gregos, a partícula «indivisível». Mas com os grandes aceleradores conseguem-se fragmentos maiores do que as partículas com que começámos e mesmo quarks, que nunca podem ser separados. O que é que isso faz a esta procura?

---

[23] (1929–) Prémio Nobel da Física de 1969 pelas suas contribuições e descobertas respeitantes à classificação das partículas elementares e suas interacções. Em 1954 Gell-Mann e G. Zweig introduziram o conceito de quark.

Feynman — Não penso que o objectivo tenha alguma vez sido esse. Os físicos estão a tentar descobrir *como é que a natureza se comporta;* podem falar descuidadamente acerca de uma «partícula final» porque é esse o modo como a natureza se parece em determinado momento, mas... suponha que as pessoas estão a explorar um novo continente, OK? Vêem água a sair do chão, já o viram antes e chamam-lhe «rio». E então dizem que estão à procura da nascente e sobem o rio, muito seguros, com tudo a correr muito bem. Mas quando chegam lá acima descobrem que todo o sistema é diferente: há um lago grande, ou fontes, ou os rios correm em círculos. Poderá dizer «Ah! Falharam!», mas nem por isso. A verdadeira razão por que estão a fazê-lo é para explorarem a terra. Se se verificar que não há nascente, talvez fiquem um pouco embaraçados no seu descuido ao explicarem-se, mas não mais do que isso. Desde que se assemelhe ao modo como as coisas são feitas, são rodas dentro de rodas, então andamos à procura da roda interna — pode não ser desse modo e, nesse caso, andaremos à procura do que quer que seja que se descubra.

Omni — Mas certamente terá algum palpite acerca daquilo que vai encontrar; terá de haver picos e vales, e por aí fora...?

Feynman — Sim, mas e se quando lá chegar estiver tudo cheio de nuvens? Pode esperar certas coisas, pode trabalhar com teoremas sobre a topologia dos cursos de água, mas e se encontrar uma espécie de nevoeiro, talvez com coisas a coagularem, sem poder distinguir a terra do ar? Toda a ideia de que partiu foi-se! É esse o tipo de excitação que acontece de vez em quando. Somos presunçosos se dissermos «vamos encontrar a partícula final ou as leis de unificação do campo» ou «a» qualquer coisa. Se nos surpreender, o cientista ficará ainda mais deliciado. Pensa que ele vai dizer «oh, não é o que esperava, não há uma par-

tícula final, já não quero explorá-la»? Não, ele vai dizer «mas que raio é isto então?».

Omni — Preferia ver isso acontecer?

Feynman — Não faz mesmo diferença nenhuma, obtenho aquilo que obtiver. Também não pode dizer que vai ser *sempre* surpreendente. Há alguns anos estava muito céptico sobre as teorias de *gauge*[24], em parte porque esperava que a interacção nuclear forte fosse mais diferente da electrodinâmica do que parece ser. Estava à espera de nevoeiro e agora, afinal, assemelha-se a picos e vales.

Omni — As teorias físicas vão continuar a ser cada vez mais abstractas e matemáticas? Poderia haver hoje um teórico como Faraday, no início do século XIX, que não era matematicamente sofisticado, mas tinha uma poderosa intuição sobre a física?

Feynman — Diria que as probabilidades são fortemente contra isso. Por um lado, precisamos da matemática até para compreender o que foi feito até agora. Além disso, o comportamento dos sistemas subnucleares é tão estranho quando comparado com aqueles com que o cérebro aprendeu a lidar que a análise *tem* de ser muito abstracta; para compreender o gelo é preciso perceber coisas que são muito diferentes do próprio gelo. Os modelos de Faraday eram mecânicos — molas, fios e bandas de tensão no espaço — e as sua imagens vinham da geometria básica. Penso que já compreendemos tudo o que podíamos daquele ponto de vista; aquilo que encontrámos neste século é suficientemente diferente e obscuro para que o progresso futuro necessite de muita matemática.

Omni — ... com anúncios para escolas de programação em cada caixa de fósforos!...

---

[24] Teorias na física de partículas que descrevem as várias interacções entre as partículas subatómicas.

Feynman — Pois. Não acredito na ideia de que há um punhado de gente peculiar capaz de compreender a matemática e que o resto do mundo é normal. A matemática é uma descoberta humana e não é mais complicada do que aquilo que os humanos podem compreender. Tinha um livro de cálculo que dizia: «O que um tolo pode fazer, outro também pode.» Aquilo que já fomos capazes de perceber sobre a natureza pode parecer abstracto e ameaçador para alguém que não o tenha estudado, mas foram tolos que o fizeram e na próxima geração todos os tolos vão compreendê-lo.

Há uma tendência para a pompa nisto tudo, de fazer tudo parecer muito profundo. O meu filho está a tirar um curso de filosofia e ontem à noite estávamos a ver uma coisa sobre Espinosa e era um pensamento do mais infantil! Havia uns atributos e umas substâncias, todo um mastigar sem sentido, e desatámos a rir. Como é que podíamos fazer aquilo? Aqui está o grande filósofo holandês e nós a rir-nos dele. Mas era porque não havia desculpa para aquilo! No mesmo período havia o Newton, havia o Harvey a estudar a circulação do sangue, havia pessoas com métodos de análise com os quais estavam a fazer progressos!

Pode pegar em qualquer das proposições do Espinosa, pegar nas proposições contrárias e olhar para o mundo que não vai conseguir dizer quais é que estão certas. Sem dúvida, as pessoas estavam fascinadas porque ele teve a coragem de pegar nestas grandes questões, mas não serve de nada ter a coragem de pegar nelas se não se chegar a lado nenhum.

Omni — Nas suas palestras publicadas, os comentários do filósofo encontram alguns obstáculos...

Feynman — Não é a filosofia que me aborrece, é a pompa. Se pelo menos eles se rissem de si próprios! Se pelo

menos dissessem «acho que é assim, mas o von Leipzig acha que é de outra maneira e ele também tem um bom argumento». Se explicassem que aquela é a sua melhor tentativa... mas tão poucos o fazem; em vez disso, reflectem na possibilidade de não haver uma partícula fundamental e dizem que devemos parar de trabalhar e, em vez disso, ponderar com grande profundidade. «Ainda não pensaram o suficiente, primeiro deixem-me definir-lhes o mundo.» Bem, cá vou investigá-lo *sem* o definir!

Omni — Como é que sabe qual é o problema que tem o tamanho certo para atacar?

Feynman — Quando andava no liceu, tinha esta noção de que podemos avaliar a importância do problema e multiplicá-la pela probabilidade de o resolver. Sabe como é um miúdo com uma mente técnica, ele gosta da ideia de optimizar tudo... bem, de qualquer modo, se conseguir a combinação certa destes factores, não passa o resto da vida a chegar a lado nenhum com um problema profundo, nem a resolver muitos pequenos problemas que outros também conseguiriam resolver.

Omni — Tomemos o problema que lhe deu a si, a Schwinger e Tomonaga o prémio Nobel. Três aproximações diferentes: estava a solução do problema particularmente madura?

Feynman — Bem, a electrodinâmica quântica tinha sido inventada em finais dos anos 20 pelo Dirac e outros, logo após a própria mecânica quântica. Eles já a tinham fundamentalmente correcta, mas quando se ia calcular as respostas entrava-se numas equações complicadas que eram muito difíceis de resolver. Conseguia-se uma boa aproximação de primeira ordem, mas quando se tentava refiná-la com correcções começavam a acumular-se umas quantidades infinitas. Toda a gente sabia disso há vinte anos; estava no final de todos os livros sobre teoria quântica.

Então tivemos os resultados das experiências do Lamb[25] e do Rutherford[26] nos desvios de energia do electrão dos átomos de hidrogénio. Até aí a previsão grosseira tinha sido o suficiente, mas agora havia um número muito preciso: 1060 megaciclos, ou lá o que era. E toda a gente disse «que diabo, este problema tem de ser resolvido». Sabia-se que a teoria tinha problemas, mas agora havia mesmo este número muito preciso.

E, assim, o Hans Bethe pegou neste número e fez umas estimativas para evitar as infinidades, subtraindo este efeito daquele, de modo que as quantidades que tendiam a ir para o infinito eram interrompidas e, provavelmente, terminariam nesta ordem de magnitude, aparecendo com algo como 1000 megaciclos. Lembro-me de que ele tinha convidado uma série de gente para uma festa na sua casa, em Cornell, mas, entretanto, tinha sido chamado para fazer uma consultoria fora. Telefonou durante a festa e disse-me que tinha descoberto isto no comboio. Quando voltou, deu uma palestra sobre o assunto e mostrou como este procedimento de corte evitava as infinidades, mas era ainda tudo muito *ad hoc* e confuso. Ele disse que seria bom se alguém pudesse mostrar como é que podia ser limpo. Fui ter com ele depois e disse «oh, isso é fácil, eu posso fazer isso». Vê, é que eu tinha começado a ter ideias sobre isto quando estava no MIT. Nessa altura até tinha cozinhado uma resposta — errada, é claro. Vê, isto é onde o Schwinger, o Tomonaga e eu entramos, no desenvolvimento de um modo de transformar este procedimento em análise sólida — tecnicamente, para manter a invariância relativística durante

[25] Willis Lamb (1913–), Prémio Nobel da Física de 1955 pelas suas descobertas acerca da estrutura fina do espectro do átomo de hidrogénio.

[26] Ernest Rutherford, 1.º barão Rutherford de Nelson (1871–1937), físico britânico nascido na Nova Zelândia, que fundou a física nuclear.

todo o caminho. O Tomonaga já tinha sugerido como é que podia ser feito e, por esta altura, o Schwinger estava a desenvolver o seu próprio método.

Então fui ter com o Bethe com o meu método para o fazer. O engraçado é que não sabia como resolver nem o problema mais simples nesta área — devia ter aprendido muito antes, mas tinha estado ocupado a brincar com a minha própria teoria — e por isso não sabia como verificar se as ideias funcionavam. Fizemo-lo juntos no quadro e estava errado. Até pior do que antes. Fui para casa e pensei, pensei e decidi que precisava de aprender a resolver exemplos. E assim fiz, voltei a ir ter com o Bethe, tentámos e resultou! Nunca fomos capazes de descobrir o que é que tinha corrido mal da primeira vez... algum erro estúpido.

Omni — Quanto é que isso o atrasou?

Feynman — Não muito, talvez um mês. Mas fez-me bem porque revi o que tinha feito e convenci-me de que tinha de funcionar e que aqueles diagramas que inventei para manter as coisas direitas estavam mesmo certos.

Omni — Apercebeu-se nessa altura de que viriam a ser chamados «diagramas de Feynman», de que estariam nos livros?

Feynman — Não, mas lembro-me de um momento particular. Estava de pijama, a trabalhar no chão com papéis à minha volta, com estes diagramas esquisitos com barrigas e linhas espetadas. Disse para mim próprio se não seria engraçado se estes diagramas fossem de facto úteis, outras pessoas começassem a utilizá-los e a *Physical Review* tivesse de imprimir estas imagens ridículas? Claro que não podia prever — em primeiro lugar não tinha ideia de quantas destas imagens estariam na *Physical Review* e, em segundo lugar, nunca me ocorreu que, com tanta gente a utilizá-las, já não pareceriam esquisitas...

[Neste momento a entrevista continuou no gabinete do professor Feynman, onde o gravador se recusou novamente

a funcionar. A fita, o interruptor e o botão de gravar estavam todos em ordem; então Feynman sugeriu tirar a cassete e pô-la novamente.]

Feynman — Aí está. Vê, só é preciso conhecer o mundo. Os físicos conhecem o mundo.

Omni — Desmanchar e juntar outra vez?

Feynman — Certo. Há sempre uma pequena sujidade, ou infinidade, ou outra coisa.

Omni — Vamos pegar nisso. Nas suas palestras diz que as nossas teorias físicas funcionam bem a unificar várias classes de fenómenos e depois aparecem os raios X, ou mesões, ou algo parecido. «Há sempre muitas meadas penduradas em todas as direcções.» Quais são algumas das pontas soltas que vê na física de hoje em dia?

Feynman — Bem, há as massas das partículas: as teorias de *gauge* oferecem padrões lindos para as interacções, mas não para as massas, e precisamos de compreender este conjunto irregular de números. Na interacção nuclear forte temos esta teoria dos quarks e gluões coloridos[27], muito precisa e completamente estabelecida, mas com muito poucas previsões. É tecnicamente muito difícil conseguir um teste afinado da teoria e isso é um desafio. Creio apaixonadamente que isso é uma ponta solta; embora não haja evidência em conflito com a teoria, não é provável que façamos muitos progressos até que possamos verificar as previsões com os números.

Omni — E a cosmologia? A sugestão de Dirac de que as constantes fundamentais variam com o tempo, ou a ideia de que a lei física era diferente no instante do *big bang*?

---

[27] «Cor» é o nome dado pelos físicos a certas propriedades dos quarks e gluões, não porque tenham de facto cor, mas por falta de um nome melhor.

Feynman — Isso abriria uma grande quantidade de questões. Até agora, a física tentou encontrar leis e constantes sem perguntar donde vinham, mas podemos estar a chegar ao ponto em que seremos forçados a considerar a história.

Omni — Tem alguns palpites para isso?

Feynman — Não.

Omni — Nenhum? Não se inclina para nenhum dos lados?

Feynman — Não, de verdade. É assim que sou sobre quase tudo. Há bocado não me perguntou se achava que havia uma partícula fundamental, ou se é tudo nevoeiro; ter-lhe-ia dito que não faço a mais pequena ideia. Agora para trabalhar seriamente em alguma coisa é preciso acreditar que a resposta está *lá,* pelo que tem de se escavar com força nesse sítio, verdade? E assim, temporariamente, predispomo-nos e convencemo-nos — embora todo o tempo, na retaguarda da nossa mente, estejamos a rir-nos. Esqueça o que ouviu sobre a ciência sem preconceito. Aqui, numa entrevista, a falar do *big bang,* não tenho preconceitos, mas quando estou a trabalhar tenho uma série deles.

Omni — Preconceitos a favor de... quê? Simetria, simplicidade...?

Feynman — A favor da minha disposição do dia. Um dia estarei convencido de que há um certo tipo de simetria em que toda a gente acredita, no seguinte tentarei descobrir as consequências se não for assim, e toda a gente é louca menos eu. Mas aquilo que é pouco habitual nos bons cientistas é que, enquanto estão a fazer o que quer que estejam a fazer, não estão tão seguros deles próprios como geralmente estão os outros. Eles podem viver com uma dúvida estável, pensar «talvez seja assim» e actuar como tal, sabendo sempre que é apenas um «talvez». Muitas pessoas acham isto difícil; pensam que significa desapego ou frieza. Não é frieza! É uma compreensão muito mais

profunda e quente e significa que podemos estar a escavar em algum sítio onde estamos temporariamente convencidos de que encontraremos a resposta quando chega alguém e diz «já viste o que encontraram ali?» e então olhamos e dizemos «bem, estou no sítio errado!». Acontece a toda a hora.

Omni — Há outra coisa que parece acontecer muito na física moderna: a descoberta de aplicações para tipos de matemáticas que eram previamente «puras», como a álgebra de matrizes ou a teoria dos grupos. São os físicos mais receptivos hoje do que costumavam ser? Será menor o tempo de espera?

Feynman — Nunca houve um tempo de espera. Veja os quaterniões de Hamilton[28]: os físicos atiraram fora a maior parte deste poderoso sistema matemático e ficaram apenas com a parte — matematicamente, a mais trivial — que se tornou a análise de vectores. Mas, quando todo o poder dos quaterniões *foi* necessário para a mecânica quântica, Pauli[29] reinventou o sistema na hora, sob uma nova forma. Agora pode olhar para trás e dizer que os operadores e as matrizes de *spin* de Pauli não são mais do que os quaterniões de Hamilton... mas, se os físicos tivessem mantido o sistema na cabeça durante noventa anos, isso não teria feito mais do que umas semanas de diferença.

Digamos que tem uma doença, a granulomatose de Wegener[30], ou o que seja, e procura-a num livro médico de

---

[28] Sir William Rowan Hamilton (1805–1865), matemático irlandês que inventou os quaterniões, uma construção alternativa à análise tensorial e vectorial.

[29] Wolfgang Pauli (1900–1958), prémio Nobel da Física de 1945 pela sua descoberta do princípio de exclusão.

[30] Doença devida a lesões granulomatosas e necrosantes arteriais e venosas ao nível das vias respiratórias superiores, dos pulmões e dos rins. *(N. da T.)*

referência. Pode bem ser que então saiba mais acerca dela do que o seu médico, embora ele tenha passado todo aquele tempo na escola de medicina... vê? É muito mais fácil aprender sobre um tópico restrito e especial do que sobre um campo inteiro. Os matemáticos estão a explorar em todas as direcções e é mais rápido para um físico actualizar-se sobre o que lhe faz falta do que tentar saber tudo o que possa vir a ser útil. O problema que mencionei antes, as dificuldades com as equações nas teorias dos quarks, é o problema do físico e vamos resolvê-lo. Quando o fizermos talvez estejamos a fazer matemática. É um facto maravilhoso, algo que não compreendo, que os matemáticos tenham investigado grupos, e por aí fora, antes de eles terem aparecido em física. Mas, no que respeita à velocidade do progresso da física, não penso que seja assim tão significativo.

Omni — Mais uma questão sobre as suas palestras: diz que «a próxima grande era do despertar do intelecto humano poderá produzir um método de compreensão do conteúdo *qualitativo* das equações». O que quer dizer com isto?

Feynman — Nessa passagem estava a falar sobre a equação de Schrödinger[31]. Dessa equação pode chegar-se aos átomos a ligarem-se em moléculas, às valências químicas, mas quando se olha para a equação não se consegue ver nada da riqueza de fenómenos que os químicos conhecem; ou a ideia de que os quarks estão permanentemente ligados, de modo que não se consegue obter um quark livre — talvez sim, talvez não, mas a questão é que quando se olha para a equação que supostamente descreve o comportamento dos quarks não se consegue ver por que é assim.

---

[31] Erwin Schrödinger (1887–1961), Prémio Nobel da Física de 1933 pela descoberta de novas formas produtivas da teoria atómica.

Observam-se as equações para as forças atómicas e moleculares na água e não se consegue ver o comportamento da água, não se consegue ver a turbulência.

Omni — Isso deixa as pessoas com questões sobre a turbulência — os meteorologistas, os oceanógrafos, os geólogos e os desenhadores de aviões — em dificuldades, não é?

Feynman — Absolutamente. E poderá ser uma destas pessoas que fique tão frustada que descubra a resposta e nessa altura estará a fazer física. Com a turbulência não é o caso de a teoria física ser capaz de lidar apenas com casos simples — não o conseguimos com nenhuns. Não temos sequer uma boa teoria fundamental.

Omni — Se calhar, é o modo como os livros de texto são escritos, mas poucas pessoas fora da ciência parecem saber quão rapidamente os problemas físicos, reais e complicados, fogem da mão no que toca à teoria.

Feynman — Isso é muito má educação. A lição que se aprende à medida que se envelhece em física é que aquilo que se consegue fazer é uma pequeníssima fracção daquilo que existe. As nossas teorias são realmente muito limitadas.

Omni — Os físicos variam muito na sua capacidade de verem as consequências qualitativas de uma equação?

Feynman — Oh, sim, mas ninguém é muito bom nisso. O Dirac disse que compreender um problema físico significa ser capaz de ver a resposta sem resolver equações. Talvez tenha exagerado; talvez resolver equações seja a experiência necessária para chegar à compreensão — mas até se compreender estamos apenas a resolver equações.

Omni — Como professor, o que é que pode fazer para encorajar esta capacidade?

Feynman — Não sei. Não tenho maneira de julgar em que medida é que estou a chegar aos meus alunos.

Omni — Irá um dia um historiador da ciência seguir as carreiras dos seus estudantes, como outros fizeram com os estudantes de Rutherford, Niels Bohr ou Fermi?

Feynman — Duvido. Fico desapontado com os meus alunos a toda a hora. Não sou um professor que sabe o que está a fazer.

Omni — Mas reconhece influências no outro sentido, digamos, a influência que tiveram em si Hans Bethe ou John Wheeler...?

Feynman — Claro. Mas não sei qual é o efeito que *eu* estou a ter. Talvez seja apenas o meu carácter. Não sei. Não sou psicólogo nem sociólogo, não sei como compreender as pessoas, incluindo eu próprio. Pode interrogar-se: «Como pode este tipo ensinar? Como pode motivar-se se não sabe o que está a fazer?» Na verdade, adoro ensinar. Gosto de pensar em novos meios para olhar para as coisas quando as explico, de as tornar claras — mas talvez não esteja a torná-las mais claras; provavelmente, o que estou a fazer é a entreter-me a mim mesmo.

Aprendi a viver sem saber. Não preciso de ter a certeza de que estou a conseguir e, tal como disse antes acerca da ciência, acho que a minha vida é mais cheia porque me apercebo de que não sei o que estou a fazer. Estou deliciado com a largueza do mundo!

Omni — Quando voltávamos do escritório, parou para discutir uma conferência sobre visão a cores que vai dar. Isso está muito longe da física fundamental, não é? Será que um fisiologista não diria que está a «intrometer-se»?

Feynman — Fisiologia? Tem de ser fisiologia? Olhe, dê-me algum tempo que eu darei uma conferência sobre qualquer coisa em fisiologia. Ficarei deliciado por estudá-lo e descobrirei tudo acerca do assunto, porque posso *garantir-lhe* que seria muito interessante. Não sei nada, mas sei que *tudo é interessante* se se for suficientemente fundo.

O meu filho também é assim, embora tenha interesses muito mais vastos do que eu na idade dele. Está interessado na magia, na programação computacional, na história da igreja antiga, na topologia — oh, ele vai sofrer muito porque há demasiadas coisas interessantes. Gostamos de sentar-nos e de falar sobre quão diferentes as coisas podem ser daquilo que esperamos; veja a *Viking* a aterrar em Marte, por exemplo, estávamos a tentar imaginar sob quantas formas poderia haver vida sem que eles a encontrassem com aquele equipamento. Sim, ele é muito parecido comigo, por isso passei esta ideia de que tudo é interessante a pelo menos uma pessoa. É claro que não sei se isso é uma coisa boa ou não... vê?

desde 1950. Parte do seu tempo é passada a ensinar e outra parte é devotada à teorização sobre os pequenos fragmentos da matéria de que é feito o universo. Através da sua carreira, que começou oficialmente depois do doutoramento em Física pela Universidade de Princeton, a sua imaginação, por vezes poética, transportou-o para muitas áreas exóticas: a matemática envolvida na criação da bomba atómica, a genética de um simples vírus ou as propriedades do hélio a temperaturas extremamente baixas. O seu trabalho, merecedor do prémio Nobel, no desenvolvimento da teoria da electrodinâmica quântica ajudou a resolver muitos problemas da física, mais directamente e facilmente do que alguma vez tinha sido possível. Mas, novamente, o que pôs em marcha esta longa série de conquistas foram aquelas longas caminhadas nos bosques com o pai.

Feynman — Ele tinha um método especial para olhar para as coisas. Costumava dizer: «Supõe que éramos marcianos, descíamos à Terra e víamos estas estranhas criaturas a fazer coisas. O que pensaríamos?» «Por exemplo», diria ele, «supõe que nunca dormíamos; somos marcianos, mas temos uma consciência que funciona o tempo todo e encontramos estas criaturas curiosas que param todos os dias durante oito horas, fecham os olhos e ficam mais ou menos inertes. Teríamos alguma pergunta interessante para lhes fazer, perguntaríamos o que sentem a fazer isso o tempo todo? O que acontece às suas ideias? Estão a ir muito bem, pensam claramente e depois o que acontece? Param subitamente? Ou começam a funcionar mais lentamente e param, ou como é que desligam os pensamentos?» Mais tarde pensei muito sobre isso e, já na universidade, fiz umas experiências para tentar encontrar a resposta — o que acontece aos pensamentos quando se adormece?

Narrador — No princípio, o Dr. Feynman planeou ser engenheiro electrotécnico para pôr as mãos na física e fazer coisas úteis para si e para o mundo à sua volta. Não demorou muito tempo a perceber que, afinal, estava mais interessado naquilo que fazia as coisas funcionarem, nos princípios teóricos e matemáticos que gerem a operação do próprio universo. A sua mente tornou-se o seu laboratório.

Feynman — Quando era novo, aquilo a que chamava laboratório era apenas um lugar para brincar com as coisas, fazer rádios, engenhocas, fotocélulas, o que fosse. Fiquei muito chocado com aquilo a que chamavam um laboratório na universidade. É um lugar onde é suposto medir alguma coisa muito seriamente. Nunca medi coisa nenhuma no meu laboratório, apenas me entretive e fiz coisas. Aquele tipo de laboratório que tinha quando era novo era todo assim. E pensava que era assim que ia continuar. Bem, nesse laboratório tinha de resolver alguns problemas. Costumava reparar rádios. Tinha, por exemplo, de arranjar umas resistências para colocar em linha com uns voltímetros para correrem em diferentes escalas. Coisas assim. Por isso comecei a encontrar estas fórmulas, fórmulas eléctricas, e um amigo meu tinha um livro com fórmulas eléctricas e relações entre as resistências. Tinha coisas como «a potência é o quadrado da corrente vezes a voltagem», «a voltagem dividida pela corrente é a resistência», tinha seis ou sete fórmulas. Parecia-me que estavam todas relacionadas, que realmente não eram independentes, que uma podia vir da outra. E, assim, comecei a explorar e percebi, a partir da álgebra que tinha aprendido na escola, como tinha de proceder. Percebi que a matemática era de algum modo importante nestas coisas.

Por isso fiquei cada vez mais interessado na matemática associada à física. Além disso, a matemática, por si pró-

Nobel da Física. Em muitos aspectos, Mel Feynman teve muito a ver com essa façanha, como relata Richard Feynman.

Feynman — Bem, antes de eu nascer, ele [o meu pai] disse à minha mãe: «Este rapaz vai ser cientista.» Não se podem dizer estas coisas em frente das mulheres de hoje em dia, mas era o que se dizia naqueles tempos. Porém, ele nunca me disse para ser cientista. A maneira como o fez foi contando-me coisas quando eu era pequeno. Por exemplo — não me lembro disto —, a minha mãe diz que ele me comprou uns azulejos, azulejos de casa de banho, para eu brincar quando estava na cadeirinha depois do jantar. Ele punha os azulejos de pé como dominós e depois empurrava um para os fazer cair todos, era essa a piada daquilo. Algum tempo depois eu já sabia colocá-los de pé. Então ele dizia-me para colocar um branco, depois um azul, depois um branco, e, passado um tempo, ficou mais complicado, com três brancos, um castanho e um azul, e assim sucessivamente. Por vezes a minha mãe dizia-lhe: «Mel, deixa a criança sossegada.» Ele respondia: «Não, estou a mostrar-lhe padrões, é o mais próximo da matemática.» Aprendi a apreciar coisas que tivesse aprendido. Nunca havia qualquer pressão. Era tudo divertido, como aqueles jogos com os dominós e as tentativas de formar os padrões certos e ver os padrões no mundo. Mais tarde, quando já era mais velho, levava-me a passear nos bosques e mostrava-me os animais e os pássaros, etc., falava-me das estrelas e dos átomos e de todas as coisas. Explicava-me o que tinham de interessante; tinha uma atitude sobre o mundo e o modo de olhar para ele que eu achava profundamente científica para um homem que não tinha treino directo como cientista.

Narrador — Richard Feynman é hoje professor de Física no Instituto de Tecnologia da Califórnia, em Pasadena,

7

Richard Feynman constrói o universo

Numa entrevista anterior, não publicada, feita sob a égide da Associação Americana para o Avanço da Ciência (AAAS, no original), Feynman relembra a sua vida na ciência: uma primeira conferência aterradora, dada numa sala cheia de prémios Nobel; o convite para trabalhar na primeira bomba atómica e a sua reacção; a ciência do culto da carga e aquela chamada telefónica fatal, de madrugada, com um jornalista a informá-lo de que acabara de ganhar o prémio Nobel — resposta de Feynman: «Podia ter-me dito isso de manhã».

Narrador — Mel Feynman era um vendedor de uma empresa de uniformes de Nova Iorque. A 11 de Maio de 1918 celebrou o nascimento do seu filho Richard. Quarenta e sete anos depois, Richard Feynman recebeu o Prémio

pria, tinha um grande apelo para mim. Adorei-a toda a minha vida.

Narrador — Depois da licenciatura no Instituto de Tecnologia de Massachusetts, Richard Feynman mudou-se cerca de 640 km para sudoeste, para a Universidade de Princeton, onde, finalmente, fez o seu doutoramento. Foi aí que, com 24 anos, deu a sua primeira conferência formal. Acabou por ser uma conferência muito participada e significativa.

Feynman — Quando era estudante trabalhei com o professor Wheeler[32], como assistente de investigação, e juntos trabalhámos numa teoria sobre o funcionamento da luz, na interacção entre os átomos de diferentes lugares; nessa altura era uma teoria aparentemente interessante. Por isso o professor Wigner, que era responsável pelos seminários, sugeriu que déssemos um seminário sobre o assunto; o professor Wheeler disse que, uma vez que eu era jovem e não tinha tido oportunidade de dar seminários antes, seria uma boa oportunidade para aprender a fazê-lo. E assim esta foi a primeira conferência técnica que dei.

Comecei a prepará-la. Então Wigner[33] veio ter comigo e disse-me que achava que o trabalho era suficientemente importante e que fizera convites especiais ao professor Pauli, que era um grande professor de Física de Zurique que estava de visita, ao professor von Neumann, o maior matemático do mundo, a Henry Norris Russell, o famoso astrónomo, e a Albert Einstein, que vivia perto. Devo ter ficado completamente branco porque ele disse-me: «Agora

---

[32] John Archibald Wheeler (1911–), físico, mais conhecido do público por ter cunhado o termo «buraco negro».

[33] Eugene P. Wigner (1902–1995), Prémio Nobel da Física de 1963 pela sua contribuição para a teoria do núcleo atómico e das partículas elementares através do seu trabalho sobre os princípios da simetria.

não fique nervoso com isto, não se preocupe; para já, o professor Russell vai adormecer, não se sinta mal, ele adormece sempre nas conferências; e quando o professor Pauli for acenando com a cabeça também não se sinta bem porque ele acena sempre, tem tremores.» Aquilo acalmou-me um bocadinho, mas ainda estava preocupado; por isso o professor Wheeler prometeu-me que responderia às questões e que eu apenas tinha de dar a conferência.

Lembro-me de entrar, pode imaginar aquela primeira vez, era como atravessar o fogo. Já tinha escrito todas as equações no quadro antes de começar, pelo que todos os quadros negros estavam cheios de equações. As pessoas não querem tantas equações... querem compreender melhor as ideias. E lembro-me de me levantar para falar e lá estavam estes grandes homens na audiência e era assustador. Ainda consigo ver as minhas mãos à medida que tirava os papéis do envelope em que os tinha. Estavam a tremer. Assim que tirei os papéis e comecei a falar aconteceu-me algo que me tem acontecido sempre desde aí e que é uma coisa maravilhosa. Se estou a falar sobre física, adoro aquilo, penso apenas na física, não me preocupo onde estou, não me preocupo com nada. E correu tudo com grande facilidade. Expliquei simplesmente o assunto o melhor que podia. Não pensei em quem estava ali. Pensava apenas no problema que estava a explicar. E no fim, quando chegou o período das perguntas, não tinha nada com que me preocupar porque o professor Wheeler ia responder. O professor Pauli levantou-se — estava sentado ao lado do professor Einstein. Ele disse: «Não acho que esta teoria possa estar certa por causa disto e isto e isto, mais aquilo e aquilo, não concorda, professor Einstein?» Einstein disse: «Nãaao.» E aquele foi o melhor não que alguma vez ouvi.

Narrador — Foi em Princeton que Richard Feynman aprendeu que, mesmo que vivesse toda a vida no mundo da matemática e da física teórica, havia outro mundo lá fora que insistiria em fazer-lhe pedidos muito práticos. Nesses dias o mundo estava em guerra e os Estados Unidos tinham começado a trabalhar na bomba atómica.

Feynman — Por essa altura Bob Wilson entrou no meu gabinete para me falar de um projecto que estava a começar e tinha a ver com a produção de urânio para bombas atómicas. Disse-me que havia uma reunião às 3 da tarde e que era segredo, mas que sabia que quando eu soubesse de que segredo se tratava teria de ir também, pelo que não fazia mal contar-me. Eu disse: «Fizeste mal em contar-me o segredo; não vou contigo; vou voltar a trabalhar na minha tese.» Ele saiu da sala, dizendo: «Vamos ter uma reunião às 3.» Isto aconteceu de manhã. Comecei a andar de um lado para o outro e a pensar nas consequências de a bomba ficar nas mãos dos alemães, e essa coisa toda, e decidi que seria muito excitante e importante fazer alguma coisa. Por isso fui à reunião às 3 horas e parei o meu trabalho de doutoramento.

O problema era separar os isótopos de urânio para fazer a bomba. O urânio vinha com dois isótopos: o U_{235} era o reactivo e era preciso separá-lo. Wilson tinha inventado um esquema para fazer a separação — fazendo um feixe de iões e juntando-os; como a velocidade dos dois isótopos à mesma energia é ligeiramente diferente, se se criarem pequenos saltos ao longo de um tubo, um vai à frente do outro e é possível separá-los dessa maneira. Era este o plano que ele tinha. Nessa altura eu era teórico. Aquilo que originalmente tinha de fazer era descobrir se o dispositivo, tal como estava desenhado, era prático, se podia ser feito. Havia uma série de questões sobre as limitações

do espaço de carga, e coisas assim, e deduzi que podia ser feito.

Narrador — Mesmo tendo Feynman deduzido que o método de Wilson para separar os isótopos de urânio era teoricamente possível, foi outro o método que acabou por ser utilizado para fazer a bomba atómica. No entanto, havia ainda muito para Richard Feynman fazer com a sua teorização de alto nível no laboratório principal de Los Alamos, no Novo México, encarregado do desenvolvimento da bomba. Depois da guerra juntou-se à equipa do Laboratório de Estudos Nucleares da Universidade de Cornell. Hoje tem emoções contraditórias sobre o trabalho que fez para tornar a bomba possível. Teria feito a coisa certa ou a coisa errada?

Feynman — Não, não acho que estivesse errado no momento em que tomei a decisão. Pensei sobre o assunto e achei, correctamente, que seria muito perigoso se os nazis a obtivessem. Houve, no entanto, um erro no meu pensamento, já que depois de os alemães terem sido derrotados — o que foi muito mais tarde, três ou quatro anos depois — ainda estávamos a trabalhar muito. Não parei; nem sequer considerei que o motivo original para o fazer já não existia. E isso é uma coisa que aprendi: que, se temos uma razão muito forte para fazer alguma coisa e começamos a trabalhar nela, é preciso olhar em volta de vez em quando para ver se os motivos originais ainda estão certos. Na altura em que tomei a decisão penso que estava certo, mas ter continuado sem pensar nisso talvez tenha sido errado. Não sei o que teria acontecido se tivesse pensado no assunto. Talvez tivesse decidido continuar de qualquer modo, não sei. Mas não pensar quando as condições originais que me tinham feito tomar a decisão original mudaram foi um erro.

Narrador — Depois de cinco anos estimulantes em Cornell, o Dr. Feynman, tal como muitos outros naturais da costa leste antes e depois dele, foi atraído para a Califórnia e para o igualmente estimulante ambiente do Instituto de Tecnologia da Califórnia (Caltech). E houve outras razões.

Feynman — Primeiro, o tempo não é bom em Ithaca. Segundo, gosto de sair, de ir a clubes nocturnos e coisas dessas. Bob Bacher, de lá, convidou-me a ir e dar uma série de aulas sobre o trabalho que tinha feito em Cornell. Dei a aula e ele disse-me: «Posso emprestar-lhe o meu carro?» Gostei daquilo, levei o carro dele e fui todas as noites a Holywood e ao Sunset Strip, e andei por lá, diverti-me, e aquela mistura de bom tempo e um horizonte mais amplo do que o que está disponível numa pequena cidade no Norte do estado de Nova Iorque convenceram-me, finalmente, a vir para aqui. Não foi muito difícil. Não foi um erro. Foi outra decisão que não foi um erro.

Narrador — No Instituto de Tecnologia da Califórnia, o Dr. Feynman tinha o lugar de professor de Física Teórica Richard Chace Tolman. Em 1954 recebeu o Prémio Albert Einstein e em 1962 a Comissão de Energia Atómica concedeu-lhe o Prémio E. O. Laurence pela sua «contribuição especialmente meritória para o desenvolvimento, utilização e controlo da energia atómica». Finalmente, em 1965 recebeu o maior dos prémios científicos, o prémio Nobel. Partilhou-o com Sin-Itiro Tomonaga, do Japão, e Julian Scwinger, de Harvard. Para o Dr. Feynman, este prémio Nobel teve um rude acordar.

Feynman — O telefone tocou e o homem disse que era de uma emissora. Estava muito aborrecido por ser acordado. Foi essa a minha reacção natural. Sabe como é, está meio acordado e está aborrecido. E então ele diz: «Gostaríamos de informá-lo de que ganhou o prémio Nobel.»

volvimento de uma teoria que viria a definir o novo campo emergente da electrodinâmica quântica. É, como diz o Dr. Feynman, «a teoria de tudo o resto». Não se aplica à energia nuclear ou às forças da gravidade, mas sim à interacção dos electrões com as partículas de luz chamadas fotões. Está subjacente aos fluxos de electricidade, ao fenómeno do magnetismo e ao modo como os raios X são produzidos e interagem com outras formas da matéria. O «quantum», em electrodinâmica quântica, reconhece uma teoria de meados dos anos 20 que diz que os electrões que rodeiam o núcleo de cada átomo estão limitados a certos estados quânticos ou níveis de energia. Podem existir apenas nesses níveis e em nenhuns outros intermédios. Estes níveis de energia quantizados são determinados, entre outras coisas, pela intensidade da luz que atinge o átomo.

Feynman — Uma das maiores e mais importantes ferramentas da física teórica é o cesto dos papéis. É preciso saber quando deve ser posto de lado. Na verdade, aprendi quase tudo o que sei sobre electricidade, magnetismo, mecânica quântica e tudo o mais durante as tentativas para desenvolver aquela teoria. E aquilo por que acabei por ganhar o prémio Nobel aconteceu em 1947, quando a teoria de toda a gente, a teoria normal que estava a tentar resolver, estava em dificuldades; então o Bethe descobriu que, se fizéssemos as coisas certas — tipo esquecermo-nos de umas coisas e não de outras —, conseguiríamos as respostas correctas comparadas com a experiência e deu-me algumas sugestões. Por essa altura eu sabia tanto de electrodinâmica por ter tentado esta teoria maluca e a ter escrito sob 655 formas diferentes que sabia fazer o que ele queria, como controlar e organizar o cálculo de um modo suave e conveniente, com métodos poderosos. Por outras palavras, utilizei a velha maquinaria que tinha desenvolvido para produzir a minha própria teoria — parece a

coisa mais óbvia, mas durante muitos anos não me lembrei disto — e descobri que nessa altura já era extremamente poderosa e podia fazer coisas pela velha teoria muito mais depressa do que qualquer outra antes disso.

Narrador — Entre muitas outras coisas, a teoria da electrodinâmica quântica do Dr. Feynman proporciona uma nova compreensão sobre as forças que mantêm a matéria unida. Também adiciona um pouco mais àquilo que sabemos sobre as propriedades do infinitamente pequeno, as partículas de vida curta que compõem todo o universo. À medida que os físicos têm penetrado cada vez mais fundo na estrutura da natureza, têm descoberto que aquilo que parecia muito simples pode ser muito complexo e que o que parecia muito complexo é, afinal, muito simples. As suas ferramentas são os poderosos aceleradores que podem fracturar partículas atómicas em fragmentos cada vez mais pequenos.

Feynman — Quando começamos, olhamos para a matéria e vemos muitos fenómenos diferentes — ventos, ondas, e luas e todo esse tipo de coisas. E tentamos reconhecê-los. Será o movimento do vento semelhante ao movimento das ondas, e por aí fora? Gradualmente, descobrimos que muitas, muitas coisas são semelhantes. Não há uma variedade tão grande como pensamos. Temos todos os fenómenos e todos os princípios subentendidos e um dos princípios mais úteis parece ser a ideia de que as coisas são feitas de outras coisas. Descobrimos, por exemplo, que toda a matéria é feita de átomos, e então muita coisa é compreendida desde que compreendamos as propriedades dos átomos. E a princípio é suposto os átomos serem simples, mas verifica-se que para explicar todas as variedades, os fenómenos da matéria, os átomos têm de ser mais complicados e que há 92 átomos. Na verdade, há muitos mais, porque têm pesos diferentes. Então o próximo problema é

compreender a variedade das propriedades dos átomos. E descobrimos que os próprios átomos são feitos de constituintes, neste caso particular o núcleo à volta do qual andam os electrões. E todos os átomos diferentes são apenas conjuntos diferentes de electrões. É um belo sistema de unificação que funciona.

Todos os átomos diferentes são a mesma coisa com um número diferente de electrões. No entanto, os núcleos também diferem. E então começamos a estudar os núcleos. Quando começámos as experiências de colisão dos núcleos — Rutherford, etc. — vimos logo que havia uma grande variedade. Desde 1914 descobriu-se que no princípio eram complicados, mas então percebeu-se que podiam ser compreendidos se também fossem formados por constituintes. São feitos de protões e neutrões e interagem com uma força que os mantém juntos. Para compreender os núcleos temos de compreender essa força um pouco melhor. Por acaso no caso dos átomos também havia uma força, é uma força eléctrica que compreendemos. Então, para além dos electrões, também havia uma força eléctrica, que representamos por fotões de luz. A luz e a força eléctrica estão integradas numa coisa chamada fotões, pelo que no mundo exterior, por assim dizer, fora do núcleo, estão electrões e fotões. A teoria do comportamento dos electrões é a electrodinâmica quântica e foi por trabalhar nela que ganhei o prémio Nobel.

Quando chegamos ao núcleo, vemos que é feito de protões e neutrões, mas há também uma força estranha. O próximo problema é tentar compreender esta força. Várias sugestões de que poderia haver outras partículas foram feitas por Yukawa[34] e fizeram-se experiências coli-

[34] Hideki Yukawa (1907–1981), Prémio Nobel da Física de 1949 pela previsão da existência dos mesões.

sem nenhuma razão especial por Murray Gell-Mann, colega do Dr. Feynman, há alguns anos. Para surpresa do Dr. Gell-Mann, o escritor irlandês James Joyce já tinha antecipado esse nome, trinta anos antes, no seu livro *Finnegan's Wake*. A frase-chave era «três quarks para o senhor Mark». Isto é uma coincidência ainda maior porque, como o Dr. Feynman explicou, os quarks que compõem as partículas do universo parecem vir em trios. Na busca dos quarks, os físicos estão a colidir protões e neutrões a energias muito altas, na esperança de que, no processo, apareçam os quarks constituintes.

Feynman — Tudo verdade, e uma das coisas que têm atrasado a teoria dos quarks é que, se a coisa fosse feita de quarks, quando colidimos dois protões, devíamos alguma vez produzir três quarks. Verifica-se que, neste modelo dos quarks de que estamos a falar, os quarks transportam cargas eléctricas muito peculiares. Todas as partículas que conhecemos no mundo contêm cargas integrais. Normalmente uma carga eléctrica, positiva ou negativa, ou nenhuma. Mas na teoria dos quarks estes carregam cargas com menos um terço ou mais um terço de carga. Se tais partículas existissem, seriam óbvias, porque o número de bolhas que deixariam numa câmara quando fazem um traçado seria muito menor. Digamos que tinha uma carga de um terço; então atingiria um nono dos átomos — o quadrado — ao longo do caminho, pelo que haveria um nono das bolhas que se obtêm para uma partícula normal. E isto é óbvio; se virmos um traçado levemente marcado, então alguma coisa está errada. E já se procurou e procurou tal traçado e ainda não foi encontrado. Este é um dos problemas sérios; é a excitação. Estaremos no caminho certo ou andamos às voltas na escuridão quando a resposta está mesmo aqui à direita ou estamos mesmo quase a cheirá-la e ainda não o conseguimos bem? Quando

o conseguirmos, talvez possamos compreender por que é que aquela experiência parece diferente.

Narrador — Então e se estas experiências de grande potência com colisões de átomos e câmaras de bolhas mostrarem que o mundo é feito de quarks? Poderemos alguma vez vê-los de uma maneira prática?

Feynman — Bem, para o problema da compreensão dos hadrões e dos muões, e assim sucessivamente, não consigo ver no presente nenhuma aplicação prática, ou virtualmente nenhuma. No passado muitas pessoas disseram que não conseguiam ver uma aplicação e mais tarde encontraram-na. Muita gente prometeria, nessas circunstâncias, que alguma coisa viria a ser útil. No entanto, para ser honesto — quero dizer tonto; dizer que nunca haverá nada que seja útil é obviamente uma tolice, por isso vou ser tolo —, vou dizer que estas coisas nunca terão uma aplicação, tanto quanto consigo ver. Sou demasiado parvo para o ver. OK? Então para que é que se faz isto? As aplicações não são as únicas coisas no mundo. É interessante compreender de que é que o mundo é feito. É o mesmo interesse, a mesma curiosidade, do homem que o faz construir telescópios. Qual é a utilidade de descobrir a idade do universo? Ou o que são estes quasares que explodem a grandes distâncias? Quer dizer, qual é a utilidade da astronomia? Nenhuma. No entanto, é interessante. Por isso é o mesmo tipo de exploração do nosso mundo que sigo e é a curiosidade que estou a satisfazer. Se a curiosidade humana representa uma necessidade, nesse sentido a tentativa de satisfazer essa curiosidade é uma aplicação prática. É esta a maneira como o vejo no presente. Não faria qualquer promessa sobre a sua utilidade económica.

Narrador — Sobre a própria ciência e o que significa para nós, o Dr. Feynman é muito relutante em filosofar sobre o assunto. No entanto, isso não o impede de ter

algumas ideias interessantes e provocatórias sobre o que ele acredita que a ciência é e não é.

Feynman — Bem, diria que é o mesmo que sempre foi desde o dia em que começou. É a busca do entendimento de um assunto ou coisa baseada no princípio de que o que acontece na natureza é verdadeiro e é o julgamento da validade da teoria que o descreve. Se Lysenko diz que, se cortarmos as caudas dos ratos durante quinhentas gerações, eles nascem sem cauda (não sei se ele diz isto ou não; digamos que o Sr. Jones o diz), então, se o tentarmos e não resultar, sabemos que não é verdade. Esse princípio, a separação do verdadeiro e do falso pela experiência, esse princípio e o resultante corpo de conhecimento que é consistente com esse princípio, isso é a ciência.

Para a ciência também trazemos, para além da experimentação, uma quantidade enorme de tentativas do intelecto humano para a generalização. Por isso não é apenas uma mera colecção de todas as coisas que acontece serem verdadeiras nas experiências. Não é apenas uma colecção de factos sobre o que acontece quando se cortam as caudas aos ratos porque isso seria demasiado para o termos na cabeça. Encontrámos um grande número de generalizações. Por exemplo, se é verdade para os ratos e os gatos, dizemos que é verdade para os mamíferos. Então descobrimos se é verdade para os outros animais, depois descobrimos se é verdade para as plantas e, finalmente, torna-se uma propriedade da vida que não herdamos uma característica adquirida. Não é exactamente verdade, por acaso. Já descobrimos experiências que mostram que as células transportam informação através da mitocôndrias, ou assim, pelo que nos modificamos no caminho. Mas, como todos os princípios devem ser o mais abrangentes possível, tão gerais quanto possível, e ainda estar em completo acordo com a experiência, está aí o desafio.

Veja, o problema de obter factos a partir da experiência é que parece muito, muito simples; tenta-se e vê-se; mas o homem tem um carácter fraco e é muito mais difícil do que se pensa tentar e ver o que dá. Por exemplo, veja-se a educação. Aparece um tipo que vê o modo como as pessoas ensinam matemática e diz «eu tenho uma ideia melhor; vou fazer um computador de brincar e ensinar com isso». E tenta-o com um grupo de crianças — não tem muitas crianças, talvez alguém lhe dê uma turma para ele experimentar. Ele adora o que está a fazer, está excitado, compreende completamente como funciona o seu método; os miúdos sabem que é uma coisa nova e também ficam muito excitados. Aprendem muito, muito bem, aprendem a aritmética regular melhor do que os outros miúdos. Então faz-se um teste — eles aprenderam a aritmética. É registado como um facto que o ensino da aritmética pode ser melhorado com este método. Mas isto não é um facto, porque uma das condições da experiência foi o homem que inventou o método ter ensinado ele próprio. O que queremos mesmo saber é, se tivéssemos este método descrito num livro para um professor mediano (e há professores medianos; há professores em todo o mundo e muitos devem ser medianos) que pega no livro e tenta ensinar com o método descrito, se o resultado seria ou não melhor. Por outras palavras, o que acontece é que temos todo o tipo de afirmações de facto sobre educação, sobre sociologia, mesmo psicologia — todo o tipo de coisas que são, diria, pseudociência. Fizeram estatísticas que dizem que fizeram com muito cuidado. Fizeram experiências que não são de facto experiências controladas. Os resultados não são realmente reprodutíveis em experiências controladas. E relatam tudo isto. Porque a ciência que é feita cuidadosamente é bem sucedida e, fazendo isto assim, pensam que conseguem a mesma honra. Tenho um exemplo.

Nas ilhas Salomão, como muitas pessoas sabem, os nativos não compreendiam os aviões que desciam durante a guerra e levavam todo o tipo de bens para os soldados. Por isso agora têm cultos dos aviões. Constroem faixas de aterragem artificiais e ateiam fogos ao longo das faixas para imitarem as luzes e estes pobres nativos sentam-se em caixas de madeira, com auscultadores de madeira e ponteiros de bambu a fazerem de antenas, movendo a cabeça para trás e para a frente, com radares feitos de madeira e todo o tipo de coisas, na esperança de atraírem os aviões e receberem produtos. Estão a imitar a acção. É a mesma coisa que o outro fez. Bem, uma quantidade horrível da nossa actividade moderna, em muitos campos, é este tipo de ciência. A aviação é uma ciência, dá muito trabalho. Também dá muito trabalho esculpir aquelas coisas, aqueles aviões de madeira, mas não quer dizer que estejam a descobrir alguma coisa.

A ciência penal, a reforma das prisões (compreender o motivo por que as pessoas cometem crimes) — veja-se o mundo —, compreendemo-la cada vez melhor com a visão moderna das coisas. É preciso aprender mais sobre a educação, mais sobre o crime; os resultados dos testes estão a baixar e há mais pessoas na prisão; os jovens cometem crimes e não os compreendemos. Não está a resultar descobrir algo sobre estes assuntos utilizando esta imitação de método científico como se faz agora. Não sei se o método científico funcionaria nestes campos, se soubéssemos aplicá-lo. Mas deste modo é particularmente fraco. Talvez haja outro método. Por exemplo, ouvir as ideias do passado e a experiência das pessoas talvez seja uma boa alternativa. Só é bom não ligar às ideias do passado quando se tem outra fonte de informação independente que se decidiu seguir. Mas é preciso ver quem se está a seguir quando se ignora a sabedoria das pessoas que olha-

ram para estas coisas, pensaram sobre elas e, de modo não científico, chegaram a uma conclusão. Têm tanto direito à razão como nós, nos tempos modernos, a chegarmos igualmente a uma conclusão por um modo não científico.

E então que tal? Estou a sair-me bem como filósofo?

Narrador — Nesta edição do «Futuro para a ciência» — uma série gravada de entrevistas com laureados Nobel — ouviram o Dr. Richard Feynman, do Instituto de Tecnologia da Califórnia. A série foi preparada sob os auspícios da Associação Americana para o Avanço da Ciência.

8

A relação da ciência com a religião

Numa espécie de experiência do intelecto, Feynman toma os vários pontos de vista de um painel imaginário que representa o pensamento de cientistas e espiritualistas e discute os pontos de concordância e discordância entre a ciência e a religião, antecipando em duas décadas o debate actual entre estes dois modos fundamentais de procura da verdade. Entre outras questões, questiona se os ateus podem ter morais baseadas no que a ciência lhes diz, tal como os espiritualistas têm morais baseadas na crença em Deus — um tópico excitante, mesmo para Feynman.

Nesta era de especialização, os homens que conhecem muito bem um campo são muitas vezes incompetentes para discutirem outro. Os grandes problemas das relações entre uns aspectos e outros da actividade humana têm, por esta

razão, sido cada vez menos discutidos em público. Quando olhamos para os grandes debates do passado sobre estes assuntos, ficamos invejosos desses tempos, já que deveríamos ter gostado da excitação de uma tal argumentação. Os velhos problemas, como a relação da ciência com a religião, ainda estão connosco e acredito que nos põem dilemas tão difíceis como sempre, embora não sejam discutidos publicamente muitas vezes por causa dos limites da especialização.

Interesso-me por este problema há muito tempo e gostaria de o discutir. Dada a minha evidente falta de conhecimento e compreensão sobre a religião (uma falta que se tornará mais óbvia à medida que formos prosseguindo), vou organizar a discussão da seguinte maneira: vou supor que não é um homem, mas um grupo de homens que estão a discutir o problema, que o grupo é composto por especialistas de diferentes campos — várias ciências, várias religiões, etc. — e que vamos discutir o problema de vários ângulos, como um painel. Cada um exporá o seu ponto de vista, que poderá ser moldado e modificado pela discussão posterior. Mais, imagino que alguém foi escolhido para ser o primeiro a apresentar as suas visões e que sou eu o escolhido.

Vou começar por apresentar um problema ao painel. Um jovem criado numa família religiosa estuda uma ciência e, em resultado disso, começa a duvidar — e talvez mais tarde a descrer — do Deus do seu pai. Isto não é um exemplo isolado, está sempre a acontecer. Embora não tenha estatísticas sobre isto, creio que muitos cientistas — na verdade, acho que mais de metade dos cientistas — realmente não acreditam no Deus dos seus pais, isto é, não acreditam num Deus no sentido convencional.

Agora, uma vez que a crença num Deus é uma característica central da religião, este problema que selec-

cionei ilustra fortemente o problema das relações da ciência com a religião. Por que é que este jovem se tornou descrente?

A primeira resposta que podemos ouvir é muito simples. Veja, ele é ensinado por cientistas e (como acabei de fazer notar), eles são todos ateus de coração, pelo que o mal se espalha de uns para os outros. Mas, se conseguirem considerar esta visão, acho que sabem menos de ciência do que eu de religião.

Outra resposta pode ser que o conhecimento limitado é perigoso; este jovem aprendeu alguma coisa e pensa que já sabe tudo, mas em breve vai crescer, ultrapassar esta sofisticação dos iniciados e perceber que o mundo é mais complicado e começará novamente a compreender que tem de existir um Deus.

Não acho que seja necessário que ele recue. Há muitos cientistas — homens que se consideram eles próprios maduros — que ainda não acreditam em Deus. De facto, como gostaria de explicar mais tarde, a resposta não é que o jovem ache que sabe tudo — é exactamente o contrário.

Uma terceira resposta que podem obter é que este jovem realmente não compreende a ciência correctamente. Não acredito que a ciência possa provar a não existência de Deus, acho que isso é impossível. E, se é impossível, não será a crença na ciência e num Deus — um Deus normal da religião — uma possibilidade consistente?

Sim, é consistente. Apesar de ter dito que mais de metade dos cientistas não acreditam em Deus, muitos cientistas *acreditam* tanto na ciência como na religião de um modo perfeitamente consistente. Mas esta consistência, embora possível, não é fácil de obter e gostaria de tentar discutir duas coisas: por que não é fácil de obter e se vale a pena tentar consegui-la.

Quando digo «acreditar em Deus», é claro que é sempre um *puzzle* — o que é Deus? O que quero dizer é o tipo de Deus pessoal, característico das religiões ocidentais, a quem se reza e que tem algo a ver com a criação do universo e nos guia moralmente.

Para o estudante, quando aprende ciência, há duas fontes de dificuldades na tentativa de unir a ciência e a religião. A primeira fonte de dificuldade é esta — é imperativo da ciência duvidar; é absolutamente necessário para o progresso da ciência ter a incerteza como parte fundamental da nossa natureza interior. Para fazermos progressos no conhecimento temos de permanecer modestos e admitir que não sabemos. Nada é certo ou provado para além de qualquer dúvida. Investigamos por curiosidade, porque é *desconhecido,* não porque já conhecemos a resposta. E, à medida que obtemos mais informação nas ciências, não é que estejamos a descobrir a verdade, mas sim que isto ou aquilo é mais ou menos provável.

Isto é, se investigamos mais, descobrimos que as afirmações da ciência não são sobre o que é verdade ou mentira, mas sim afirmações sobre aquilo que é conhecido com diferentes graus de certeza: «É muito mais provável que isto e aquilo seja verdade do que não seja», ou «isto e isto é quase certo, mas ainda há um resto de dúvida», ou — no outro extremo — «bem, realmente não sabemos». Cada um dos conceitos da ciência está numa escala graduada algures entre, mas nunca na extremidade de, falsidade absoluta ou verdade absoluta.

É necessário, creio, aceitar esta ideia não apenas para a ciência, mas também para as outras coisas; tem um grande valor reconhecer a ignorância. É um facto que, quando tomamos decisões na nossa vida, não sabemos

necessariamente se estamos a agir correctamente; apenas pensamos que estamos a fazer o melhor que podemos e é isso que devemos fazer.

Atitude de incerteza

Acho que quando sabemos que na verdade vivemos na incerteza devemos admiti-lo; tem um grande valor perceber que não sabemos as respostas para as diferentes perguntas. Esta atitude mental — esta atitude de incerteza — é vital para o cientista e é ela que o estudante primeiro precisa de adquirir. Torna-se um hábito de pensamento. Uma vez adquirida, já não é mais possível recuar.

O que acontece então é que o jovem começa a duvidar de tudo porque não pode ter verdades absolutas. E a pergunta modifica-se um pouco de «existe um Deus?» para «quão certo é que existe um Deus?». Esta alteração subtil é uma grande pancada e representa a partição dos caminhos entre a ciência e a religião. Não acredito que um verdadeiro cientista possa voltar a acreditar do mesmo modo. Embora haja cientistas que acreditam em Deus, não creio que pensem em Deus do mesmo modo que as pessoas religiosas o fazem. Se são consistentes para com a sua ciência, acho que dizem alguma coisa como isto para si próprios: «Tenho quase a certeza de que existe um Deus. A dúvida é muito pequena.» Isto é muito diferente de dizer «sei que existe um Deus». Não acredito que um cientista possa alguma vez ter essa visão — esse entendimento verdadeiramente religioso de que existe um Deus —, essa certeza absoluta que as pessoas religiosas têm.

É claro que este processo de dúvida não começa sempre por atacar a questão da existência de Deus. Geralmente, algumas crenças particulares, como a questão da

vida depois da morte, ou pormenores da doutrina religiosa, como os pormenores da vida de Cristo, são escrutinados primeiro. No entanto, é mais interessante ir logo ao problema central de uma maneira franca e discutir a visão mais extrema que duvida da existência de Deus.

Logo que a questão tenha sido removida do absoluto e comece a deslizar na escala da incerteza poderá acabar em diferentes posições. Em muitos casos ficará muito perto da certeza. Por outro lado, para alguns, o resultado líquido do escrutínio da teoria que os seus pais mantêm sobre Deus poderá ser a reivindicação de que, quase de certeza, está errada.

Crença em Deus — e nos factos da ciência

Isto leva-nos à segunda dificuldade que o nosso estudante tem na tentativa de fusão da ciência com a religião: por que é que tantas vezes a fé em Deus — pelo menos no Deus do tipo religioso — acaba por ser pouco razoável e improvável? Penso que a resposta tem a ver com as coisas científicas — os factos ou factos parciais — que o homem aprende.

Por exemplo, o tamanho do universo é impressionante, sendo nós uma partícula minúscula que gira em torno do Sol, entre centenas de milhares de milhões de sóis numa galáxia, ela própria uma entre milhares de milhões de galáxias.

Novamente surge a relação próxima do homem biológico com os outros animais e de uma forma de vida com a outra. O homem é uma personagem tardia num vasto drama em desenvolvimento; poderá o resto ser apenas um andaime para a sua criação?

E novamente surgem os átomos, de que tudo parece ser construído, seguindo leis imutáveis. Nada pode escapar-

-lhes; as estrelas são feitas do mesmo material, os animais são feitos do mesmo material, mas numa tal complexidade que misteriosamente parecem vivos — como o próprio homem.

É uma grande aventura contemplar o universo para além do homem, pensar no que significa sem o homem — tal como foi durante a maior parte da sua longa história e tal como é na grande maioria dos lugares. Quando esta visão objectiva é finalmente alcançada, e o mistério e a majestade da matéria são apreciados, voltar a focar o olho objectivo no homem visto como matéria e ver a vida como parte de um mistério universal da maior profundidade é experimentar algo que raramente é descrito. Geralmente, acaba em gargalhada, prazer na futilidade de tentar compreender. Estas visões científicas resultam em fascínio e mistério, perdidos na fronteira da incerteza, mas parecem ser tão profundas e impressionantes que a teoria de que tudo está simplesmente arranjado como um palco para Deus ver o homem lutar pelo bem e pelo mal parece ser inadequada.

Assim, suponhamos que é este o caso particular do nosso estudante e que cresce a convicção de que a prece individual, por exemplo, não é ouvida (não estou a tentar provar a não existência da realidade divina; estou a tentar dar-lhes uma ideia, ou alguma simpatia, das razões por que muitos pensam que a prece não tem significado). É claro que o resultado desta dúvida é virar o padrão da dúvida para os problemas éticos, já que, na religião que aprendemos, os problemas morais estão ligados à palavra de Deus e, se Deus não existe, qual será a palavra?

Porém, surpreendentemente, acho eu, os problemas morais acabam por sair incólumes. A princípio talvez o estudante decida que umas poucas coisas estavam erradas,

mas frequentemente, mais tarde, reverte a sua opinião, acabando com uma visão moral que não é muito diferente.

Parece existir uma espécie de independência nestas ideias. No final é possível duvidar da divindade de Cristo e, no entanto, acreditar firmemente que é uma coisa boa fazer ao vizinho o que gostaríamos que ele nos fizesse. É possível ter ambas as visões em simultâneo, e diria que espero que pensem que os meus colegas cientistas ateus se integram bem na sociedade.

O comunismo e o ponto de vista científico

De passagem, gostaria de dizer que, embora a palavra «ateísmo» esteja tão ligada ao «comunismo», as visões comunistas são a antítese das científicas, no sentido em que no comunismo as respostas a todas as questões — tanto as políticas como as morais — são dadas sem discussão e sem dúvida. O ponto de vista científico é o exacto oposto disto, ou seja, todas as questões devem suscitar dúvidas e ser discutidas; devemos argumentar sobre tudo — observar as coisas, verificá-las e então alterá-las. O governo democrático está muito mais próximo desta ideia porque há discussão e uma hipótese de mudança. Não se lança o navio numa direcção definida. É verdade que, se houver uma tirania de ideias, de modo que se saiba exactamente o que é verdade, se actua com decisão e isso parece bem — durante algum tempo. Mas em breve o navio rumará na direcção errada e já ninguém poderá modificá-la. Por isso as incertezas da vida numa democracia são, penso, muito mais consistentes com a ciência.

Embora a ciência cause algum impacto em muitas ideias religiosas, não afecta o seu conteúdo moral. A religião tem muitos aspectos, responde a todos os tipos de questões.

Por exemplo, responde a questões sobre o que são as coisas, donde vêm, o que é o homem, o que é Deus — as propriedades de Deus, e por aí fora. Deixem-me chamar a isto o aspecto metafísico da religião. Também nos diz outra coisa — como devemos comportar-nos. Ponham de parte a ideia de como devem actuar em certas cerimónias e que ritos devem levar a cabo, o que quero dizer é que nos diz como devemos comportar-nos na vida em geral, no sentido moral. Dá respostas a questões morais; proporciona um código moral e ético. Deixem-me chamar a isto o aspecto ético da religião.

Agora sabemos que, mesmo com os valores morais garantidos, os seres humanos são muito fracos; é necessário lembrar-lhes os valores morais para que sejam capazes de seguir a sua consciência. Não se trata apenas de ter a consciência correcta, é também a questão de manter a força para fazer o que está certo. E é necessário que a religião providencie a força, o conforto e a inspiração para seguir as visões morais. Este é o aspecto inspirador da religião. Dá inspiração não apenas para a conduta moral, mas também para as artes e para todo o tipo de grandes pensamentos e acções.

Interligações

Estes três aspectos da religião estão interligados e é geralmente sentido que, tendo em vista esta interligação próxima de ideias, atacar uma característica do sistema é atacar toda a estrutura. Os três aspectos estão ligados mais ou menos da seguinte forma: o aspecto moral, o código moral, é a palavra de Deus — o que nos envolve numa questão metafísica. Então chega a inspiração, porque estamos a trabalhar a vontade de Deus; somos para Deus;

em parte sentimos que estamos com Deus. Isto é uma grande inspiração porque põe as acções de cada um em contacto com o universo em geral.

Por isso estas três coisas estão muito bem interligadas. A dificuldade é esta: a ciência entra ocasionalmente em conflito com a primeira destas três categorias — o aspecto metafísico da religião. Por exemplo, no passado havia um argumento sobre se a Terra era o centro do universo — se a Terra girava em torno do Sol ou se se mantinha parada. O resultado foi um conflito terrível e difícil, mas foi finalmente resolvido — com a religião a recuar neste caso particular. Mais recentemente houve um conflito sobre a questão de o homem ter ou não ascendentes animais.

O resultado em muitas destas situações é uma retirada da visão metafísica, mas, contudo, não se verifica o colapso da religião. E, mais, parece não haver qualquer alteração, apreciável ou fundamental, da visão moral.

Afinal, a Terra move-se em torno do Sol — não será melhor voltar a outra face? Faz alguma diferença que a Terra esteja parada ou que se mova em torno do Sol? Podemos esperar o conflito novamente. A ciência está em desenvolvimento e serão descobertas coisas novas que estarão em desacordo com a teoria metafísica actual de certas religiões. Na verdade, mesmo com todas as retiradas da religião no passado, ainda há um conflito real para indivíduos particulares que aprendem ciência e que estudaram religião. A coisa ainda não foi muito bem integrada; existem aqui conflitos reais — e, no entanto, as morais não são afectadas.

Acontece que o conflito é duplamente difícil nesta região metafísica. Em primeiro lugar, os factos podem estar em conflito, mas, mesmo que não estivessem, a atitude é diferente. O espírito da incerteza na ciência é uma atitude para com as questões metafísicas muito diferente

da certeza e da fé que são pedidas na religião. Há definitivamente um conflito, creio — tanto de facto como de espírito —, sobre o aspecto metafísico da religião.

Em minha opinião, não é possível à religião encontrar um conjunto de ideias metafísicas que garantidamente não entre em conflito com uma ciência em avanço e mudança contínuos, que se dirige para o desconhecido. Não sabemos responder às questões; é impossível encontrar uma resposta que um dia não se descubra que está errada. A dificuldade surge porque a ciência e a religião estão ambas a tentar responder a perguntas do mesmo âmbito.

A ciência e as questões morais

Por outro lado, não acredito que surja um conflito real com a ciência no aspecto ético, porque acho que as questões morais estão fora do âmbito da ciência.

Deixem-me apresentar três ou quatro argumentos para ilustrar por que acredito nisto. Primeiro, houve conflitos no passado entre as visões científica e religiosa sobre os aspectos metafísicos e, no entanto, as visões morais mais antigas não colapsaram, não se alteraram.

Segundo, existem homens bons que praticam a ética cristã e que não acreditam na divindade de Cristo. Eles não se acham aqui em qualquer inconsistência.

Terceiro, embora acredite que, de tempos a tempos, a evidência científica possa ser interpretada como proporcionando algum suporte a um aspecto particular da vida de Cristo, por exemplo, ou de outras ideias religiosas metafísicas, parece-me que não há evidência científica que apoie a regra dourada. Parece-me que é algo diferente.

Agora vejamos se sou capaz de dar uma pequena explicação filosófica sobre o porquê de ser diferente — sobre a ciência não poder afectar as bases fundamentais da moral.

O problema humano típico, cuja resposta a religião ambiciona proporcionar, é sempre da seguinte forma: devo fazer isto? Devemos nós fazer isto? Deve o governo fazer isto? Para responder a esta questão podemos resolvê-la em duas partes: primeira, se fizer isto, o que acontecerá?; segunda, quero que isso aconteça? O que resultaria daí de bom?

Agora uma questão de forma: se fizer isto, o que acontecerá? é estritamente científico. Na verdade, a ciência pode ser definida como um método para, e um corpo de informação obtido para, tentar responder apenas a questões que possam ser colocadas na forma «se fizer isto, o que acontecerá?». A técnica, fundamentalmente, é experimenta e verás. Depois junta-se uma grande quantidade de informação proveniente destas experiências. Todos os cientistas concordarão com que uma questão — qualquer uma, filosófica ou outra — que não possa ser colocada de forma que possa ser testada pela experiência (ou, em termos simples, que não possa ser colocada na forma «se fizer isto, o que acontecerá?») não é uma questão científica; está fora do âmbito da ciência.

Defendo que, queira-se ou não que algo aconteça — que valor tem o resultado ou como se julga o valor do resultado (que é a outra extremidade da pergunta «devo fazer isto?») —, isso deve ficar fora da ciência porque não é uma questão a que se possa responder apenas sabendo o que acontece; é preciso *julgar* o que acontece de uma maneira moral. Assim, por esta razão teórica, penso que há uma consistência total entre a visão moral — ou o aspecto ético da religião — e a informação científica.

Voltando ao terceiro aspecto da religião — o aspecto inspirador —, isso leva-me de novo à questão central que gostaria de apresentar ao painel imaginário. Hoje a fonte de inspiração — para a força e para o conforto — em qualquer religião está intimamente tecida com o aspecto metafísico, isto é, a inspiração vem do trabalho com Deus, obedecendo à sua vontade e sentindo-se uno com ele. As amarras emocionais ao código moral começam a ser severamente enfraquecidas quando a dúvida, mesmo pequena, se expressa sobre a existência de Deus. Por isso, quando a crença em Deus se torna insegura, este método particular de obtenção de inspiração falha.

Não sei qual é a resposta para este problema central — o problema de manter o real valor da religião como fonte de força e coragem para a maioria dos homens, enquanto, ao mesmo tempo, não é pedida uma fé absoluta nos aspectos metafísicos.

As heranças da civilização ocidental

A civilização ocidental, parece-me, tem duas grandes heranças. Uma é o espírito científico de aventura — a aventura no desconhecido, um desconhecido que deve ser reconhecido como tal de modo a ser explorado; a exigência de que os mistérios não solucionáveis do universo permaneçam sem resposta; a atitude de que tudo é incerto; para sintetizar, a humildade do intelecto. A outra grande herança é a ética cristã — a base da acção no amor, a irmandade de todos os homens, o valor do indivíduo —, a humildade do espírito.

Estas duas heranças são, logicamente, fortemente consistentes. Mas a lógica não é tudo; é preciso um coração para seguir uma ideia; se as pessoas estão a voltar para a

religião, para que estão a voltar? Será a igreja moderna um lugar para dar conforto a um homem que duvida de Deus, mais, que não acredita em Deus? Será a igreja moderna um lugar para dar conforto e encorajamento ao valor dessas dúvidas? Até agora não conseguimos a força e o conforto para manter uma ou outra destas heranças de um modo que ataca os valores da outra? Será isto inevitável? Como é que podemos conseguir inspiração para manter estes dois pilares da civilização ocidental de modo a permanecerem juntos, com todo o vigor e sem receios mútuos? Não será este o problema central do nosso tempo? Coloco-o ao painel para discussão.

Referências

«O prazer da descoberta» é a transcrição editada de uma entrevista com Richard P. Feynman transmitida pela BBC2 no programa televisivo intitulado *Horizon: The Pleasure of Finding Things Out*. É reproduzida com a autorização do produtor Christopher Syckes, de Carl Feynman e de Michelle Feynman.

A conferência «Os computadores do futuro» foi originalmente publicada em 1985 como tributo à memória de Nishina. É aqui reproduzida com a amável permissão do professor K. Nishijima, em representação da Fundação Nishina.

«O papel da cultura científica na sociedade moderna» é publicado com a autorização da Società Italiana di Fisica.

A transcrição da clássica conferência «Há muito espaço lá ao fundo», dada por Richard Feynman a 29 de Dezembro de 1959 na reunião anual da Sociedade Americana de Física no Instituto de Tecnologia da Califórnia (Caltech), foi publicada pela primeira vez no volume de

Fevereiro de 1960 da revista *Caltech's Engineering and Science (Engenharia e Ciência de Caltech)*, que detém os direitos de autor. Foi aqui reproduzida com a sua amável permissão.

«O que é a ciência?», publicado originalmente em *The Physics Teacher*, volume 9, pp. 313-320, é reproduzido com autorização. *Copyright* © American Association of Physics Teachers, 1969.

«O homem mais inteligente do mundo» é publicado com a autorização da revista *Omni*. *Copyright* © Omni Publications International, Ltd., 1992.

«A relação da ciência com a religião» foi originalmente publicado pelo Instituto de Tecnologia da Califórnia (Caltech), na revista *Caltech's Engineering and Science*. É reproduzido com autorização.

CIÊNCIA ABERTA

1. O JOGO DOS POSSÍVEIS
François Jacob
2. UM POUCO MAIS DE AZUL
H. Reeves
3. O NASCIMENTO DO HOMEM
Robert Clarke
4. A PRODIGIOSA AVENTURA DAS PLANTAS
Jean-Marie Pelt/Jean-Pierre Cuny
5. COSMOS
Carl Sagan
6. A MEDUSA E O CARACOL
Lewis Thomas
7. O MACACO, A ÁFRICA E O HOMEM
Yves Coppens
8. OS DRAGÕES DO ÉDEN
Carl Sagan
9. UM MUNDO IMAGINADO
June Goodfield
10. O CÓDIGO CÓSMICO
Heinz R. Pagels
11. CIÊNCIA: CURIOSIDADE E MALDIÇÃO
Jorge Dias de Deus
12. O POLEGAR DO PANDA
Stephen Jay Gould
13. A HORA DO DESLUMBRAMENTO
H. Reeves
14. A NOVA ALIANÇA
Ilya Prigogine/Isabelle Stengers
15. PONTES PARA O INFINITO
Michael Guillen
16. O FOGO DE PROMETEU
Charles Lumsden/Edward O. Wilson
17. O CÉREBRO DE BROCA
Carl Sagan
18. ORIGENS
Robert Shapiro
19. A DUPLA HÉLICE
James Watson
20. OS TRÊS PRIMEIROS MINUTOS
Steven Weinberg
21. «ESTÁ A BRINCAR, SR. FEYNMAN!»
Richard P. Feynman
22. NOS BASTIDORES DA CIÊNCIA
Sebastião J. Formosinho
23. VIDA
Francis Crick
24. SUPERFORÇA
Paul Davies
25. QED — A ESTRANHA TEORIA DA LUZ E DA MATÉRIA
Richard P. Feynman
26. A ESPUMA DA TERRA
Claude Allègre
27. BREVE HISTÓRIA DO TEMPO
Stephen W. Hawking
28. O JOGO
Manfred Eigen/Ruthild Winkler
29. EINSTEIN TINHA RAZÃO?
Clifford M. Will
30. PARA UMA NOVA CIÊNCIA
Steven Rose/Lisa Appignanesi
31. A MÃO ESQUERDA DA CRIAÇÃO
Jonh D. Barrow/Joseph Silk
32. O GENE EGOÍSTA
Richard Dawkins
33. HISTÓRIA CONCISA DAS MATEMÁTICAS
Dirk J. Struik
34. CIÊNCIA, ORDEM E CRIATIVIDADE
David Bohm/F. David Peat
35. O QUE É UMA LEI FÍSICA
Richard P. Feynman
36. QUANDO AS GALINHAS TIVEREM DENTES
Stephen Jay Gould
37. «NEM SEMPRE A BRINCAR, SR. FEYNMAN!»
Richard P. Feynman
38. CAOS — A CONSTRUÇÃO DE UMA NOVA CIÊNCIA
James Gleick
39. SIMETRIA PERFEITA
Heinz R. Pagels
40. ENTRE O TEMPO E A ETERNIDADE
Ilya Prigogine/Isabelle Stengers
41. OS SONHOS DA RAZÃO
Heinz R. Pagels
42. VIAGEM ÀS ESTRELAS
Robert Jastrow
43. MALICORNE
Hubert Reeves
44. INFINITO EM TODAS AS DIRECÇÕES
Freeman J. Dyson
45. O ÁTOMO ASSOMBRADO
P. C. W. Davies/J. R. Brown
46. MATÉRIA PENSANTE
Jean-Pierre Changeux/Alain Connes
47. A NATUREZA REENCONTRADA
Jean-Marie Pelt
48. O CAMINHO QUE NENHUM HOMEM TRILHOU
Carl Sagan/Richard Turco
49. O SORRISO DO FLAMINGO
Stephen Jay Gould
50. EM BUSCA DA UNIFICAÇÃO
Abdus Salam/Paul Dirac/ /Werner Heisenberg
51. OBJECTOS FRACTAIS
Benoît Mandelbrot
52. A QUARTA DIMENSÃO
Rudy Rucker
53. DEUS JOGA AOS DADOS?
Ian Stewart
54. OS PRÓXIMOS CEM ANOS
Jonathan Weiner
55. IDEIAS E INFORMAÇÃO
Arno Penzias
56. UMA NOVA CONCEPÇÃO DA TERRA
Seiya Uyeda
57. HOMENS E ROBOTS
Hans Moravec
58. A MATEMÁTICA E O IMPREVISTO
Ivar Ekeland
59. SUBTIL É O SENHOR
Abraham Pais
60. FLATLAND — O PAÍS PLANO
Edwin A. Abbott
61. FEYNMAN — A NATUREZA DO GÉNIO
James Gleick
62. COMIDA INTELIGENTE
Jean-Marie Bourre

63. O FIM DA FÍSICA
Stephen Hawking

64. UNIVERSO, COMPUTADORES E TUDO O RESTO
Carlos Fiolhais

65. OS HOMENS
André Langaney

66. OS PROBLEMAS DA BIOLOGIA
John Maynard Smith

67. A CRIAÇÃO DO UNIVERSO
Fang Li Zhi/Li Shu Xian

68. A MÁQUINA MÁGICA
A. K. Dewdney

69. O MELHOR DE FEYNMAN
Organização de Laurie M. Brown e John S. Rigden

70. ÚLTIMAS NOTÍCIAS DO COSMOS
Hubert Reeves

71. A VIDA É BELA
Stephen Jay Gould

72. OS PROBLEMAS DA MATEMÁTICA
Ian Stewart

73. POEIRAS DE ESTRELAS
Hubert Reeves

74. A PALAVRA DAS COISAS
Pierre Laszlo

75. A EXPERIÊNCIA MATEMÁTICA
Philip J. Davis/Reuben Hersh

76. EINSTEIN VIVEU AQUI
Abraham Pais

77. SOMBRAS DE ANTEPASSADOS ESQUECIDOS
Carl Sagan/Ann Druyan

78. O PRIMEIRO SEGUNDO
Hubert Reeves

79. A COMUNIDADE VIRTUAL
Howard Rheingold

80. UM MODO DE SER
João Lobo Antunes

81. SONHOS DE UMA TEORIA FINAL
Steven Weinberg

82. A MAIS BELA HISTÓRIA DO MUNDO
Hubert Reeves/Joël de Rosnay/ /Yves Coppens/Dominique Simonnet

83. O SÉCULO DOS QUANTA
João Varela

84. O FIM DAS CERTEZAS
Ilya Prigogine

85. A PRIMEIRA IDADE DA CIÊNCIA
António Manuel Baptista

86. O QUARK E O JAGUAR
Murray Gell-Mann

87. A DIVERSIDADE DA VIDA
Edward O. Wilson

88. A LIÇÃO ESQUECIDA DE FEYNMAN
David L. Goodstein/Judith R. Goodstein

89. ORDEM OCULTA
John H. Holland

90. UM MUNDO INFESTADO DE DEMÓNIOS
Carl Sagan

91. O RATINHO, A MOSCA E O HOMEM
François Jacob

92. O ÚLTIMO TEOREMA DE FERMAT
Amir D. Aczel

93. A MENTE VIRTUAL
Roger Penrose

94. SOBRE O FERRO NOS ESPINAFRES
Jean-François Bouvet (org.)

95. BILIÕES E BILIÕES
Carl Sagan

96. CINCO EQUAÇÕES QUE MUDARAM O MUNDO
Michael Guillen

97. A CIÊNCIA NO GRANDE TEATRO DO MUNDO
António Manuel Baptista

98. CONCEITOS FUNDAMENTAIS DA MATEMÁTICA
Bento de Jesus Caraça

99. O MUNDO DENTRO DO MUNDO
John D. Barrow

100. A CULTURA CIENTÍFICA E OS SEUS INIMIGOS
O LEGADO DE EINSTEIN
Gerald Holton

101. VIAGENS NO ESPAÇO-TEMPO
Jorge Dias de Deus

102. IMPOSTURAS INTELECTUAIS
Alan Sokal/Jean Bricmont

103. O ESTRANHO CASO DO GATO DA SR.ª HUDSON
Colin Bruce

104. AVES, MARAVILHOSAS AVES
Hubert Reeves

105. O HOMEM QUE SÓ GOSTAVA DE NÚMEROS
Paul Hoffman

106. DECOMPONDO O ARCO-ÍRIS
Richard Dawkins

107. FULL HOUSE
Stephen Jay Gould

108. O UNIVERSO ELEGANTE
Brian Greene

109. GÖDEL, ESCHER, BACH
Douglas R. Hofstadter

110. O SIGNIFICADO DE TUDO
Richard P. Feynman

111. GENOMA
Matt Ridley

112. ZERO
Charles Seife

113. O MISTÉRIO DO BILHETE DE IDENTIDADE E OUTRAS HISTÓRIAS
Jorge Buescu

114. $E = MC^2$
David Bodanis

115. AS LIGAÇÕES CÓSMICAS
Carl Sagan

116. O DISCURSO PÓS-MODERNO CONTRA A CIÊNCIA
António Manuel Baptista

117. O NOSSO HABITAT CÓSMICO
Martin Rees

118. OS GÉNIOS DA CIÊNCIA
Abraham Pais

119. NOVE IDEIAS MALUCAS EM CIÊNCIA
Robert Ehrlich

120. A COISA MAIS PRECIOSA QUE TEMOS
Carlos Fiolhais

121. FEITICEIROS E CIENTISTAS
Georges Charpak/Henri Broch

122. A ESPÉCIE DAS ORIGENS
António Amorim

123. COMO CONSTRUIR UMA MÁQUINA DO TEMPO
Paul Davies

124. O GRANDE, O PEQUENO E A MENTE HUMANA
Roger Penrose

125. COMO RESOLVER PROBLEMAS
G. Polya

126. DA FALSIFICAÇÃO DE EUROS AOS PEQUENOS MUNDOS
Jorge Buescu

127. MAIS RÁPIDO QUE A LUZ
João Magueijo

128. O SIGNIFICADO DA RELATIVIDADE
Albert Einstein

129. FRONTEIRAS DA CIÊNCIA
Rui Fausto, Carlos Fiolhais, João Queiró (coords.)

130. DA CRÍTICA DA CIÊNCIA À NEGAÇÃO DA CIÊNCIA
Jorge Dias de Deus

131. CONVERSAS COM UM MATEMÁTICO
Gregory J. Chaitin

132. Y: A DESCENDÊNCIA DO HOMEM
Steve Jones

133. CRÍTICA DA RAZÃO AUSENTE
António Manuel Baptista

134. TEIAS MATEMÁTICAS
Maria Paula S. Oliveira (coord.)

135. A RAINHA DE COPAS
Matt Ridley

136. COMO RESPIRAM OS ASTRONAUTAS
Manuel Paiva

137. O CÓDIGO SECRETO
Margarida Telo da Gama (coord.)

138. OS RELÓGIOS DE EINSTEIN E OS MAPAS DE POINCARÉ
Peter Galison

139. O COSMOS DE EINSTEIN
Michio Kaku

140. O *ANNUS MIRABILLIS* DE EINSTEIN
John Stachel

141. DESPERTAR PARA A CIÊNCIA
T. Lago, A. Coutinho, J. Calado, C. Fiolhais, F. Barriga, J. Buescu, A. Quintanilha, C. Fonseca, C. Salema, J. L. Antunes e J. Caraça

142. EINSTEIN... ALBERT EINSTEIN
Jorge Dias de Deus e Teresa Peña

143. UM POUCO DE CIÊNCIA PARA TODOS
Claude Allègre

144. O GÉNIO DA GARRAFA
Joe Schwarcz

145. CURIOSIDADE APAIXONADA
Carlos Fiolhais

146. O LIVRO DAS ESCOLHAS CÓSMICAS
Orfeu Bertolami

147. FLATTERLAND — O PAÍS AINDA MAIS PLANO
Ian Stewart

148. A IDADE NÃO PERDOA?
Luis Bigotte de Almeida

149. TEMPO E CIÊNCIA
Rui Fausto e Rita Marnoto (coords.)

150. O TECIDO DO COSMOS
Brian Greene

151. O PRAZER DA DESCOBERTA
Richard P. Feynman

152. DESCOBRIR O UNIVERSO
Teresa Lago (coord.)